

**APOYO AL PROCESO DE DESARROLLO DE UN BANCO Y UN
SERVICIO DE CALIBRACIÓN DE TERMOHIGRÓMETROS
PARA LA CORPORACIÓN CDT DE GAS**

ALVARO GABRIEL CHACÓN FIGUEROA

**PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIAS
FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA, mes día de año**

**APOYO AL PROCESO DE DESARROLLO DE UN BANCO Y UN
SERVICIO DE CALIBRACIÓN DE TERMOHIGRÓMETROS
PARA LA CORPORACIÓN CDT DE GAS**

ALVARO GABRIEL CHACÓN FIGUEROA

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO**

Director: GABRIEL FERNANDO GARCÍA SANCHEZ

Ingeniero Mecánico

Gabrielf.Garcia@upb.edu.co

PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIAS

FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA

Bucaramanga, mes día de año

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi madre Luz Estela Figueroa y a mi padre Álvaro Alexander Chacón por darme la oportunidad de formarme ética e integralmente con sus valores ofrecidos, además profesionalmente en una universidad de prestigio; a la Universidad Pontificia Bolivariana por darme las bases y conocimientos necesarios para mi formación profesional, agradezco a la Corporación CDT de GAS por darme la oportunidad de desarrollar una práctica empresarial que aportó demasiado a mis conocimientos y a mi desarrollo como futuro profesional e ingeniero mecánico, le doy gracias al ingeniero Jhon Alfonso, a la Magister Elizabeth Ayala y al tecnólogo Nicolás Palomino quienes fueron personas clave y de gran ayuda en el desarrollo de la práctica, y por último me siento muy agradecido con todos mis familiares, mi amigo Jesús Ortiz y a mi pareja sentimental Paola Pérez, quienes estuvieron durante el desarrollo de mi carrera apoyándome, emocional, profesional, íntegra y educativamente a lo largo de mi periodo académico.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION	11
2. JUSTIFICACION	12
3. OBJETIVOS.....	13
3.1 Objetivo general.....	13
3.2 Objetivos específicos	13
4. Marco teórico	14
4.1 Primera actividad: Realizar la apropiación sobre el diseño del banco de calibración de termohigrómetros del CDT de GAS.	16
4.1.1 Caudal de los rotámetros según altura de la esfera.....	19
4.1.2 Procedimiento normalizado guía para el desarrollo del servicio.	20
5. Desarrollo experimental	23
5.1 Segunda actividad: Culminar el ensamble del prototipo del banco junto con los patrones adquiridos.	23
5.2 Tercera actividad: Ejecutar pruebas de desempeño y alcances del banco de calibración y emitir un informe con estos resultados.....	25
5.2.1 Caracterización del blanco.	28
5.2.2 Caracterización del Saturado máximo	29
5.2.3 Caracterización al 20% humedad relativa	30
5.2.4 Medición al 50% de humedad relativa	31
5.2.5 Medición al 80% de humedad relativa	32
5.2.6 Caracterización de la incubadora 23IC.....	36
5.4.1.1 Caracterización de temperatura sin suministro de aire.....	37

5.4.1.2	Caracterización de temperatura con suministro de aire variable...	39
5.4.1.3	Caracterización de temperatura con suministro de aire constante.	40
5.4.1.4	Caracterización de humedad en la incubadora 23IC.....	42
5.4.1.5	Modificación de la tapa de la incubadora BEAR 23IC.	44
5.4.1.6	Caracterización de uniformidad y estabilidad de humedad en incubadora BEAR 23IC.	46
5.2.6.1	Caracterización estabilidad y uniformidad de la temperatura en Incubadora 23IC.	54
	57
5.3	Cuarta Actividad: ejecutar las pruebas de confirmación de método y emitir un informe con los resultados, Aseguramiento Metrológico.	61
5.4	Quinta actividad: Desarrollar procedimientos de calibración de termohigrómetros y de operación del banco de calibración, una plantilla básica de cálculo de error e incertidumbre de las mediciones para la operación del banco de calibración y un instructivo para su manejo.	69
6.	CONCLUSIONES	69
7.	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	72
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
9.	ANEXOS	74
9.1	Anexo 1	74
	Informe de análisis de funcionamiento del banco generador de humedad para revisión por alta dirección y equipo de investigación.	74
9.2	Anexo 2	80

TABLA DE GRÁFICAS

Gráfica 1: P1.0 Medición Blanco iniciando en humedad ambiente.....	28
Gráfica 2: P1.1 Medición Blanco iniciando con previo suministro de aire húmedo.....	29
Gráfica 3: P2.0 Medición saturado iniciando con humedad ambiente.	29
Gráfica 4: P2.1 Medición saturado iniciando con previo suministro de aire seco. .	30
Gráfica 5: P3.0 Medición al 20% iniciando con humedad ambiente.....	30
Gráfica 6: P3.1 Medición al 20% iniciando con previo suministro de aire seco.....	30
Gráfica 7: P3.2 Medición al 20% iniciando con previo suministro de aire húmedo.....	31
Gráfica 8: P4.0 Medición al 50% iniciando en humedad ambiente.....	31
Gráfica 9: P4.1 Medición al 50% iniciando con previo suministro de aire seco.....	31
Gráfica 10: P4.2 Medición al 50% iniciando con previo suministro de aire húmedo.	32
Gráfica 11: P5.0 Medición al 80% iniciando en humedad ambiente.	32
Gráfica 12: P5.1 Medición al 80% iniciando con previo suministro de aire seco....	32
Gráfica 13: P5.2 Medición al 80% iniciando con previo suministro de aire húmedo.	33
Lo anterior se pensó basado en uno de los documentos investigados, donde muestran que la eficiencia del saturador mejora con la altura del agua dentro del mismo; esto llevó a inferir que mientras más tiempo pudiera estar el aire en contacto con el agua, logra obtener más vapor de agua.	
Gráfica 14: Eficiencia del saturador con respecto a la altura del agua	33
Gráfica 15: Medición del saturado con bajo caudal de aire.	34
Gráfica 16: Medición de generación al punto 10 °C en la cámara sin suministro de aire.....	37
Gráfica 17: Medición de generación al punto 25°C sin suministro de aire.	37
Gráfica 18: Medición de generación al punto 40 °C sin suministro de aire.	38
Gráfica 19: Medición de generación al punto 10 °C con suministro de aire variable.	39

Gráfica 20: Medición de generación al punto 25 °C con suministro de aire variable.	39
Gráfica 21: Medición de generación al punto 40 °C con suministro de aire variable.	40
Gráfica 22: Medición de generación al punto 10 °C con suministro de aire constante.	41
Gráfica 23: Medición de generación al punto 25 °C con suministro de aire constante.	41
Gráfica 24: Medición de generación al punto 40 °C con suministro de aire constante.	41
Gráfica 25: Medición de humedad al 20% en incubadora 23IC .	42
Gráfica 26: Medición de humedad al 50% en incubadora 23IC.	43
Gráfica 27: Medición de humedad al 80% en incubadora 23IC.	43
Gráfica 28: Humedad en los 3 puntos con temperatura controlada en la incubadora 23IC.	44
Gráfica 29: Curva de estabilidad de la temperatura en la incubadora a 40°C.	55
Gráfica 30: Caracterización de temperatura agujeros Esquina-extremos de la incubadora.	56
Gráfica 31: Caracterización de temperatura agujeros centro-extremos de la incubadora.	57
Gráfica 32: Caracterización de temperatura agujeros del centro de la incubadora (8/10/4/6).	58
Gráfica 33: Curva de estabilidad de la temperatura en la incubadora a 25°C.	59
Gráfica 34: Caracterización de temperatura agujeros Medio/extremos de la incubadora.	60
Gráfica 35: Gráfica de resultados obtenidos para el medidor HL-020.	65
Gráfica 36: Gráfica de resultados obtenidos para el medidor HL-003.	67

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Esquema de ubicación de patrones e instrumentos a calibrar.	21
Ilustración 2: Diseño del banco generador de humedad.	23
Ilustración 3: Ensamble del banco como se encontró.	24
Ilustración 4: Adaptación del banco para la ejecución de pruebas.	25
Ilustración 5: Primera cámara de caracterización.....	27
Ilustración 6: Incubadora BEAR 23IC.....	36
Ilustración 7: Plano de la tapa para la cámara de temperatura.	45
Ilustración 8: Tapa original de la incubadora BEAR 23IC.....	46
Ilustración 9: Nueva tapa de caracterización para la incubadora BEAR 23IC.	46
Ilustración 10: Puntos de caracterización del volumen de la cámara.	47
Ilustración 11: Cinta de calefacción para el saturador.	52
Ilustración 12: Planos de fabricación cámara de humedad.	53
Ilustración 13: Fabricación de la cámara de calibración de humedad.	54

11/10/2018

www.upbbga.edu.co/biblioteca/formaton.php

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: APOYO AL PROCESO DE DESARROLLO DE UN BANCO Y UN SERVICIO DE CALIBRACIÓN DE TERMOHIGRÓMETROS PARA LA CORPORACIÓN CDT DE GAS.

AUTOR(ES): ALVARO GABRIEL CHACON FIGUEROA

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR(A): GABRIEL FERNANDO GARCÍA SANCHEZ

RESUMEN

El presente informe muestra los procedimientos llevados a cabo en la práctica empresarial realizada en la corporación CDT de GAS, ubicada en el km 2, vía refugio de la ciudad de piedecuesta, donde se solicitó el apoyo de un estudiante de ingeniería mecánica para completar el ensamble final de un generador de humedad, realizar pruebas de desempeño a dicho generador y una cámara de generación de temperatura ambiente, elaborar los informes de veracidad y confirmación de método, estimación de incertidumbre, elaboración de procedimientos técnicos y de operación, además de otros procesos complementarios en la etapa final de desarrollo de un banco de generación de temperatura y humedad relativa para prestar un servicio de calibración para termohigrómetros.

PALABRAS CLAVE:

Generador de humedad, Veracidad, Calibración, Humedad Relativa, Temperatura Ambiente, termohigrómetros.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

11/10/2018

www.upbbga.edu.co/biblioteca/formatoi.php

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: SUPPORT FOR THE DEVELOPMENT PROCESS OF A BENCH AND A THERMO-HYGROMETER CALIBRATION SERVICE FOR THE CDT OF GAS CORPORATION

AUTHOR(S): ALVARO GABRIEL CHACON FIGUEROA

FACULTY: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR: GABRIEL FERNANDO GARCÍA SANCHEZ

ABSTRACT

This report shows the procedures carried out in the practical company carried out in the CDT corporation of GAS, located at km 2, Via Refugio of the city of Piedecuesta, where the support of a mechanical engineering student is requested to complete the final assembly of a humidity generator, perform performance tests said generator and a room temperature generation chamber, prepare the veracity reports and method confirmation, uncertainty determination, prepare the technicians and the operation, furthermore to other complementary processes in the final stage of the development of a temperature generation bench and relative humidity to provide a calibration service for thermo-hygrometers.

KEYWORDS:

Moisture generator, Veracity, Calibration, Relative Humidity, Ambient Temperature, thermo-hygrometers.

Vº Bº DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1. INTRODUCCION

La CORPORACIÓN CDT DE GAS es una entidad sin ánimo de lucro que presta servicios de metrología hacia las empresas del sector gas e hidrocarburos, actualmente ofrecen los servicios de calibración acreditados de temperatura, volumen, presión, señales eléctricas, y otros más, sin embargo, no se cuenta con el servicio de calibración termo-higrómetros con presentación digital.

El presente proyecto de grado realizado bajo la modalidad de prácticas empresariales se solicitó en convenio entre la corporación CDT de GAS y la Universidad Pontificia Bolivariana para apoyar en las etapas finales de construcción y determinación de un banco generador de humedad para un servicio de calibración de instrumentos de medición de condiciones ambientales (temperatura y humedad), para lo cual, el practicante ejecutó una serie de actividades preestablecidas que conllevaron a la apropiación del tema, la adaptación del banco a los requerimientos de un procedimiento seleccionado y a la intención de cumplir el objetivo de que la corporación tenga a disposición dicho servicio.

Un servicio de calibración acreditado exige ciertas condiciones para desempeñarse correctamente, por lo tanto, dentro de las actividades realizadas se lograron encontrar diferentes situaciones a corregir que requirieron pruebas de desempeño y análisis para proponer mejoras en el funcionamiento del banco de calibración con el fin de acercarlo a los intervalos de medición que figura la norma y el mercado; durante este proceso y las complicaciones presentadas también se requirió investigación y apropiación de ciertos temas, donde priman la metrología y el comportamiento del aire a condiciones de temperatura y humedad ambiente, más específicamente en los intervalos de 10 °C a 40°C y 10% de humedad relativa (HR) a 90% HR, los cuales son los alcances que establece el procedimiento "TH-007" del CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA elegido como referente para establecer el servicio que se requiere.

2. JUSTIFICACION

Dentro de la medición de condiciones ambientales se encuentran 3 magnitudes identificadas como las más importantes para tener en cuenta a la hora de realizar cualquier servicio de metrología, estas magnitudes son presión, humedad y temperatura; la Corporación CDT de GAS ya cuenta con el servicio de calibración en presión y este servicio posee una buena demanda dentro de la entidad, sin embargo, cuando una empresa necesita calibrar un instrumento de condiciones ambientales, se necesita calibrar en aquellas 3 magnitudes.

Aunque el CDT de Gas también posee el servicio de calibración en temperatura, no se encuentra dentro del alcance de acreditación para condiciones ambientales, por lo que se propuso implementar un banco de calibración que contara con un generador de humedad relativa y una cámara de generación de temperatura para ofrecer a futuro el servicio completo de calibración de medidores de condiciones ambientales.

Para lograr que un servicio de calibración obtenga la acreditación, se deben realizar previamente una serie de tareas que aseguren la confiabilidad del servicio, donde es necesario elaborar caracterizaciones de desempeño, procedimientos técnicos de operación y calibración, plantillas de cálculo, instructivos de uso, corroboración de método utilizado, informes de resultados y otros procesos; por lo que, la corporación dispuso de una vacante para el desarrollo de dichas tareas.

3. OBJETIVOS.

3.1 OBJETIVO GENERAL

Apoyar el proceso de desarrollo de un banco de calibración de termo higrómetros y de un servicio de calibración bajo los requisitos de la norma NTC-ISO/IEC 17025 para el Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas – CDT de GAS.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apoyar la etapa final de diseño y ensamble de un banco de calibración de termo higrómetros.
- Llevar a cabo las pruebas de caracterización del banco y ejecutar la confirmación del método de calibración para demostrar la confiabilidad de las mediciones.
- Desarrollar los procedimientos, instructivos y plantilla de cálculo de incertidumbre de las mediciones requeridos para el manejo del banco de calibración, con miras a solicitar acreditación ante el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia – ONAC.

4. MARCO TEÓRICO

La CORPORACIÓN CDT DE GAS es una entidad sin ánimo de lucro que presta servicios de metrología hacia las empresas del sector gas e hidrocarburos, actualmente ofrecen los servicios de calibración acreditados de temperatura, volumen, presión, señales eléctricas, y otros más, sin embargo, no se cuenta con el servicio de calibración de termohigrómetros, es decir medidores digitales de temperatura y humedad, para lo cual han venido desarrollando un proyecto para acreditar y ofrecer aquel servicio, los ingenieros a cargo de esta tarea diseñaron un sistema de generación de humedad y construyeron gran parte de éste; el practicante tiene como objetivo avanzar lo más posible en este proyecto o dejarlo terminado si es posible.

Existen varios sistemas de generación de humedad entre los cuales se encuentran: generador de humedad de dos temperaturas / única presión (1-P, 2-T), generador de dos presiones / dos temperaturas (2-P, 2-T), generador de humedad por flujo dividido (2F) y Medición de la temperatura de punto de rocío; el ingeniero a cargo del proyecto eligió diseñar un generador de humedad de flujo dividido, debido a la disposición de los instrumentos necesarios.

La calibración en general consta de procesos rigurosos, ordenados y precisos, ya que está en juego determinar la óptima calidad de una medición; por lo anterior, la calibración usa varios conceptos muy importantes que determinan el éxito y acciones a realizar para el proceso. A continuación se muestran los conceptos considerados como los más utilizados e importantes para dar una introducción superficial al entendimiento del tema tratado, definidos por el VIM (Vocabulario Internacional de Metrología).

“Error de medida: Diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia (valor convencional o valor verdadero).”¹

“Incertidumbre de medida: Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando.”²

“Exactitud de medida: Proximidad existente entre un valor medido y un valor verdadero de un mensurando.

NOTA 2 — El término “exactitud de medida” no debe utilizarse en lugar de “veracidad de medida”, al igual que el término “precisión de medida” tampoco debe utilizarse en lugar de “exactitud de medida”, ya que esta última incluye ambos conceptos.”³

“Precisión de medida: Proximidad entre las indicaciones o los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto, o de objetos similares, bajo condiciones específicas.”⁴

“Patrón de medida: Realización de la definición de una magnitud dada, con un valor determinado y una incertidumbre de medida asociada, tomada como referencia”⁵.

Se presenta a continuación el cronograma de actividades estipulado en la entrega del anteproyecto con el fin de poder relacionar las actividades realizadas y enunciadas en el cuerpo del informe.

¹ BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES. Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM). Comité Conjunto para las Guías en Metrología (JCGM). 2008. 30p.

² *Ibíd.*, p. 32.

³ *Ibíd.*, p. 29.

⁴ *Ibíd.*, p. 29.

⁵ *Ibíd.*, p. 53.

Tabla 1: Cronograma de actividades

ACTIVIDAD	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE
Realizar apropiación sobre el diseño del banco de calibración de termohigrómetros del CDT de GAS.									
Culminar el ensamble del prototipo del banco junto con los patrones adquiridos.									
Ejecutar pruebas de desempeño y alcances del banco de calibración y emitir un informe con estos resultados.									
Ejecutar las pruebas de confirmación de método en laboratorio y emitir un informe con estos resultados.									
Desarrollar procedimientos de calibración de termohigrómetros y de operación del banco de calibración, una plantilla básica de cálculo de error e incertidumbre de las mediciones para la operación del banco de calibración y un instructivo para su manejo.									

Fuente: Elaboración propia.

4.1 PRIMERA ACTIVIDAD: REALIZAR LA APROPIACIÓN SOBRE EL DISEÑO DEL BANCO DE CALIBRACIÓN DE TERMOHIGRÓMETROS DEL CDT DE GAS.

Esta actividad consistió en documentarse acerca del banco para calibración de termo-higrómetros en cuanto a cómo se encontraba, cuál era su proyección, de que se componía, cuál era su principio de funcionamiento y otras características, además la información se complementó con la lectura de algunas normas tanto nacionales como internacionales sobre procesos de calibraciones en humedad relativa y temperatura ambiente, la actividad de apropiación concluyó a finales del mes de marzo; a continuación se enuncian algunas de las referencias bibliográficas más importantes.

1. Procedimiento th-007 para la calibración de medidores de condiciones ambientales de temperatura y humedad en aire.
2. Guía Técnica de Trazabilidad Metrológica e Incertidumbre de Medida en La Calibración de Higrómetros de Humedad Relativa.
3. Uncertainty in the generation of humidity.

4. Determining uncertainties of relative humidity, dew/frost-point temperature, and mixing ratio in a humidity standard generator.
5. Informes de diseño y avances del banco de generación de humedad.
6. Manuales de procedimientos sobre las actividades a realizar.

El banco de generación de humedad fue diseñado bajo los principios de funcionamiento de los generadores de dos presiones (2P) y dos temperaturas (2T); además, los generadores de flujo mixto (2F); los modelos matemáticos que mejor describen el funcionamiento de este generador están dados por la ecuación de Peter H. Huang⁶ y una segunda ecuación surgida de caracterizaciones previas.

$$RH = \frac{f(P_s, T_s)}{f(P_c, T_c)} \times \frac{e_w(T_s)}{e_w(T_c)} \times \frac{P_c}{P_s} \times 100 \% \quad (1)$$

Dónde:

$f(P_s, T_s)$ = Factor de corrección de comportamiento no ideal para el vapor de aire saturado.

$f(P_c, T_c)$ = Factor de corrección de comportamiento no ideal para el vapor en la cámara de calibración.

$e_w(T_s)$ = Presión de vapor a la temperatura del saturador.

$e_w(T_c)$ = Presión de vapor a la temperatura de la cámara.

P_c = Presión en la cámara de calibración.

P_s = Presión en el saturador.

Sin embargo, se estableció un modelo matemático posterior a caracterizaciones que se ajusta mejor al comportamiento real dentro del laboratorio del CDT de Gas,

⁶ H. Huang, Peter. DETERMINING UNCERTAINTIES OF RELATIVE HUMIDITY DEW/FROST-POINT TEMPERATURE, AND MIXING RATIO IN A HUMIDITY STANDARD GENERATOR. En: National Institute of Standards and technology. Vol1. [Consultado 27 mar. 2018]. Disponible en < https://ws680.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=901715>.

donde ya no intervienen las variables de la presión en la cámara y la presión en el saturador.

$$RH = RH_{max} \cdot \left(\frac{Q_h}{Q_h + Q_s} \right) \cdot F_{corrR} \quad (2)$$

Dónde:

RH_{max} : Humedad relativa máxima en la cámara de prueba [%]

ew_{ts} : Presión de vapor de agua del saturador [Pa]

ew_{tc} : Presión de vapor de agua de la cámara de prueba [Pa]

Q_h = Ajuste de caudal del rotámetro de aire húmedo.

Q_s = Ajuste de caudal del rotámetro de aire seco.

F_{corrHR} = Factor de corrección de humedad relativa por mezcla de flujos.

$$Ts_{abs} = Ts + F_{convT} \quad (3)$$

$$Tc_{abs} = Ts + F_{convT} \quad (4)$$

$$ew_{Ts} = EXP([a0 \cdot Ts_{abs}^{-2}] + [a1 \cdot Ts_{abs}^{-1}] + [a2 \cdot Ts_{abs}^0] + [a3 \cdot Ts_{abs}^1] + [a4 \cdot Ts_{abs}^2] + [a5 \cdot Ts_{abs}^3] + [a6 \cdot Ts_{abs}^4] + [a7 \cdot Ts_{abs}]) \quad (5)$$

$$ew_{Tc} = EXP([a0 \cdot Tc_{abs}^{-2}] + [a1 \cdot Tc_{abs}^{-1}] + [a2 \cdot Tc_{abs}^0] + [a3 \cdot Tc_{abs}^1] + [a4 \cdot Tc_{abs}^2] + [a5 \cdot Tc_{abs}^3] + [a6 \cdot Tc_{abs}^4] + [a7 \cdot Tc_{abs}]) \quad (6)$$

Dónde:

T_s : Temperatura del saturador (escalada y corregida en la HMI) [°C]

T_c : Temperatura de la cámara de prueba (escalada y corregida en la HMI) [°C]

T_{s_abs} : T_s absoluta [K]

T_{c_abs} : T_c absoluta [K]

F_{convT} =273,15

a0=-2836,5744
a1=-6028,076559
a2=19,54263612
a3=-0,02737830188
a4=0,000016261698
a5=0,00000000070229056
a6=-0,00000000000018680009
a7=2,7150305

4.1.1 Caudal de los rotámetros según altura de la esfera. Los rotámetros instalados en el banco generador de humedad se controlan mediante válvulas de aguja, y estas regulan el fluido que se permite pasar a los mismos, para luego pasar a la línea de suministro; sin embargo, la función de los rotámetros es verificar cuanto se está alterando ese flujo a medida que ajustamos las válvulas.

La mirilla de los rotámetros se encuentra en unidades de altura en [mm], por lo tanto, para conocer el caudal que pasa a medida que sube la esfera indicadora se tenían establecidas las siguientes ecuaciones que surgieron de una calibración y escala realizadas por el funcionario y supervisor a cargo del proyecto.

ROTÁMETRO QL-040 (Caudal de aire seco = Q_s)

Si: altura de la esfera $h \leq 10$ mm

$$Q_s = 10,38 \cdot h \quad (7)$$

Si: altura de la esfera $10\text{mm} < h < 130$ mm

$$Q_s = (25,34 \cdot h) - 131,2 \quad (8)$$

Si: altura de la esfera $h \geq 130$ mm

$$Q_s = (14,76 \cdot h) - 1240,38 \quad (9)$$

Dónde:

h: Altura de la esfera indicada por el rotámetro QL-040 (ingresada por el usuario)

ROTÁMETRO QL-041 (Caudal de aire húmedo = Qh)

Si: altura de la esfera $h \leq 10\text{mm}$

$$Q_s = 12,15 \cdot h \quad (10)$$

Si: altura de la esfera $h > 10\text{ mm}$

$$Q_s = (24,54 \cdot h) - 86,21 \quad (11)$$

Dónde:

h: Altura de la esfera indicada por el rotámetro QL-040 (ingresada por el usuario).

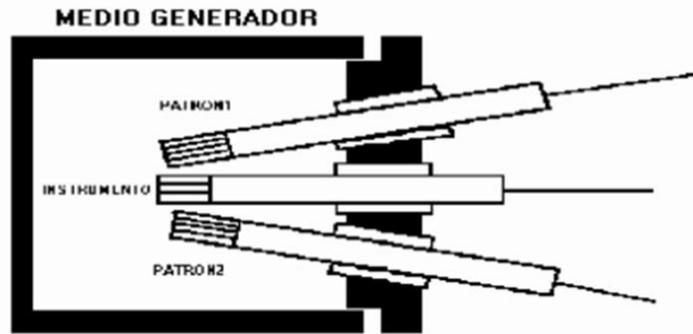
4.1.2 Procedimiento normalizado guía para el desarrollo del servicio. El procedimiento TH-007⁷ tiene un alcance definido para la aplicación a medidores de temperatura y humedad relativa en aire con presentación digital entre los rangos de temperatura de 10°C a 40°C y un rango de 10% a 90% de humedad relativa, cuyas características adecuadas de longitud, diámetro e inmersión que permitan ser introducidos en los medios generadores de temperatura y humedad relativa.

Este procedimiento establece de una manera específica la cantidad de instrumentos patrones, además de la ubicación de los mismos y el/los instrumentos a calibrar; se establece que se deben introducir los sensores en el centro de la zona de calibración a través de pasa muros habilitados en las cámaras de medición o generadoras para tal fin, los patrones se ubican a la distancia más cercana posible, de manera que el

⁷ CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA. PROCEDIMIENTO TH-007 PARA LA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE CONDICIONES AMBIENTALES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD EN AIRE: Proceso de Calibración. Madrid: CEM, Edición digital. NIPO: 706-08-007-9.

instrumento a calibrar pueda estar en medio de los dos patrones; la siguiente imagen muestra con más claridad la manera de ubicarlos.

Ilustración 1: Esquema de ubicación de patrones e instrumentos a calibrar.



Fuente: CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA. PROCEDIMIENTO TH-007 PARA LA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE CONDICIONES AMBIENTALES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD EN AIRE: Proceso de Calibración. Madrid: CEM, Edición digital. NIPO: 706-08-007-9.

El procedimiento también explica lineamientos para realizar el proceso de calibración, así como la estimación de incertidumbre en la calibración.

Debido a que se deben tener en cuenta aspectos muy importantes que pueden afectar la medición, existen aseveraciones bastante explícitas de lo que se puede, no se puede hacer, lo que se puede usar, y algunas recomendaciones para que el proceso sea más eficiente.

Uno de los aspectos que se menciona, el cual es muy importante en el proceso es el tiempo de estabilización, el cual es mayor cuando se trata de variar la humedad en sentido decreciente, las causas más comunes de este fenómeno son:

- Volumen de la cámara climática.
- Características de circulación del aire.
- Materiales de construcción y acabado de superficies.
- Temperatura ambiente.
- Nivel previo de humedad.

- Uso de materiales como plástico, nylon o gomas.
- Longitud de inmersión.

Para asegurar de que el generador o las cámaras de calibración están lo suficientemente estables se debe registrar las lecturas de temperatura y humedad de uno de los patrones durante un periodo mínimo de 20 minutos tras lograr el punto de calibración deseado.

En el proceso de calibración se exige por lo tanto que se realice en puntos de humedad creciente a una temperatura fija, se debe establecer previamente un periodo de secado de la cámara junto con los instrumentos inmersos en ella, este secado debe ser menor a la humedad mínima de calibración, los instrumentos no se deben someter a una temperatura o humedad mayor a la máxima establecida por el fabricante para evitar el daño de los mismos o en su configuración de lectura. Se establece que los generadores y las cámaras de calibración deben estar previamente caracterizados, definiendo así, las peores condiciones y medidas encontradas, las cuales no pueden ser sobrepasadas en posteriores calibraciones. El proceso de lectura que se repetirá para cada punto de calibración será el siguiente.

1. Lectura del primer patrón corregida según certificado, t_{11} y h_{11} .
2. Lectura del instrumento a calibrar, t_{x1} y h_{x1} .
3. Lectura del segundo patrón corregida según certificado, t_2 y h_2 .
4. Lectura del instrumento a calibrar, t_{x2} y h_{x2} .
5. Lectura del primer patrón corregida según certificado, t_{12} y h_{12} .

NOTA: En el caso de que se calibraran simultáneamente varios instrumentos, en el punto 4 se leerán éstos en orden inverso al del punto 2.

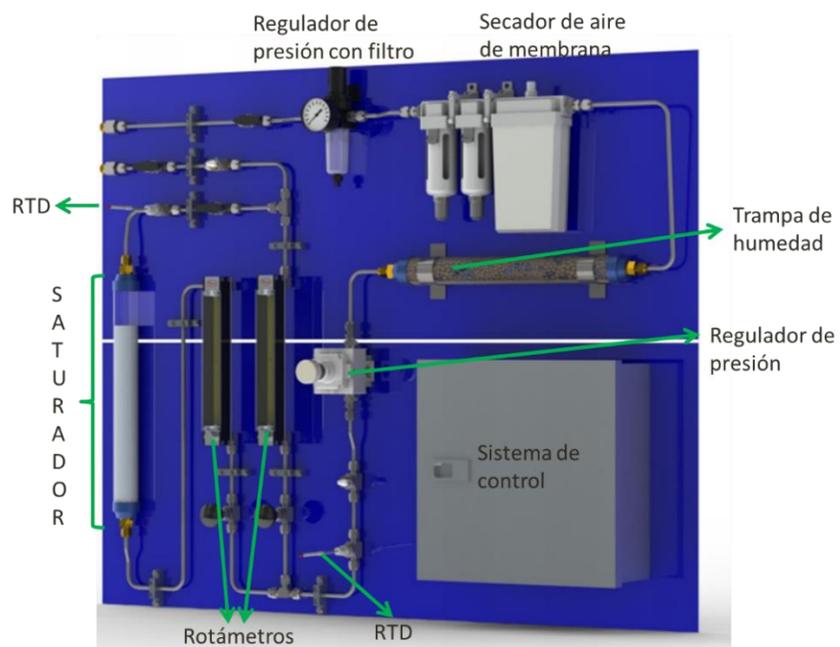
5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

A partir de la segunda actividad del cronograma, el desarrollo de la práctica empezó a ser más experimental, ya que se inicia a apoyar con la construcción final del diseño conceptual del banco generador de humedad relativa, pruebas de desempeño, caracterizaciones, modificaciones al banco de generación, el diseño y la adquisición de algunos elementos necesarios para las tareas mencionadas.

5.1 SEGUNDA ACTIVIDAD: CULMINAR EL ENSAMBLE DEL PROTOTIPO DEL BANCO JUNTO CON LOS PATRONES ADQUIRIDOS.

Esta actividad consistió en completar parcialmente el ensamble diseñado para el banco generador de humedad. Luego de conocer y recibir la inducción a los laboratorios de la corporación, se procedió a completar parcialmente el ensamble diseñado para el banco generador de humedad. Debido a que no se dispuso de los elementos necesarios para terminar el ensamble idéntico al diseño, el banco se completó con adaptaciones para ejecutar las pruebas de desempeño respectivas; a continuación, se muestran las imágenes del diseño del banco, como se halló y como se adaptó.

Ilustración 2: Diseño del banco generador de humedad.



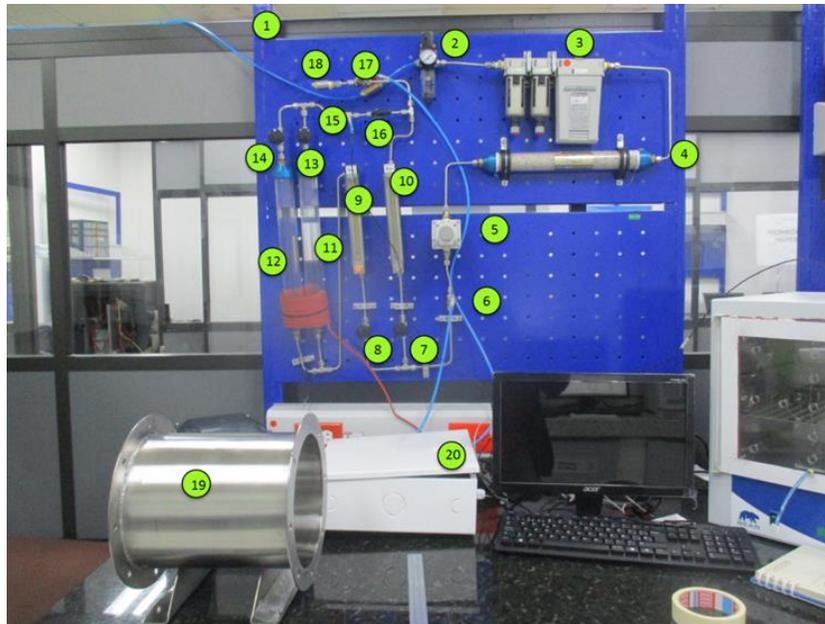
Fuente: Jhon Alfonso. Corporación CDT de GAS.

Ilustración 3: Ensamble del banco como se encontró.



Fuente: Jhon Alfonso. Corporación CDT de GAS.

Ilustración 4: Adaptación del banco para la ejecución de pruebas.



Fuente: CDT de GAS.

Tabla 2: Componentes del banco de generación de humedad.

N°	Componente	N°	Componente
1	Válvula de bola suministro aire compresor	11	Saturador 1
2	Regulador de presión con filtro de aceite	12	Saturador 2
3	Secadores de membrana	13	Válvula de aguja del saturador 1
4	Trampa de humedad	14	Válvula de aguja del saturador 2
5	Regulador de presión 0-30 psig	15	RTD
6	Punto de medición presión regulador	16	Válvula de bola de caudal húmedo
7	Válvula de aguja aire seco	17	Punto de medición de presión saturador
8	Válvula de aguja aire húmedo	18	Salida de aire hacia la cámara de humedad
9	Rotámetro aire húmedo	19	Cámara de calibración de humedad
10	Rotámetro aire seco	20	Control (HMI) del banco de calibración

5.2 TERCERA ACTIVIDAD: EJECUTAR PRUEBAS DE DESEMPEÑO Y ALCANCES DEL BANCO DE CALIBRACIÓN Y EMITIR UN INFORME CON ESTOS RESULTADOS.

Desde inicios del mes de febrero hasta la fecha se ejecutaron pruebas de desempeño con el fin de verificar el alcance al que se le puede apuntar con el banco de generación de humedad relativa y la cámara de temperatura ambiente, los

resultados obtenidos demostraron que el intervalo para ofrecer el servicio de calibración en el CDT de GAS es de 20% a 80% de humedad relativa con una temperatura fija en $20\text{ °C} \pm 2\text{°C}$, y en cuanto a temperatura se establecieron dos escenarios de calibración con los intervalos de 10 °C a 40°C logrando una humedad fija del $30\% \text{ hr} \pm 1\% \text{ hr}$ para termo-higrómetros de campo y entre 10°C y 25°C con una humedad relativa fija en $50\% \pm 1\% \text{ hr}$ para termo-higrómetros de laboratorios, sin embargo, se adquirió una nueva cámara dispuesta para la calibración de humedad y aún hace falta ejecutar pruebas de homogeneidad y estabilidad dentro de la cámara de temperatura, por lo que no se logrará realizar la totalidad de pruebas necesarias para definir el servicio.

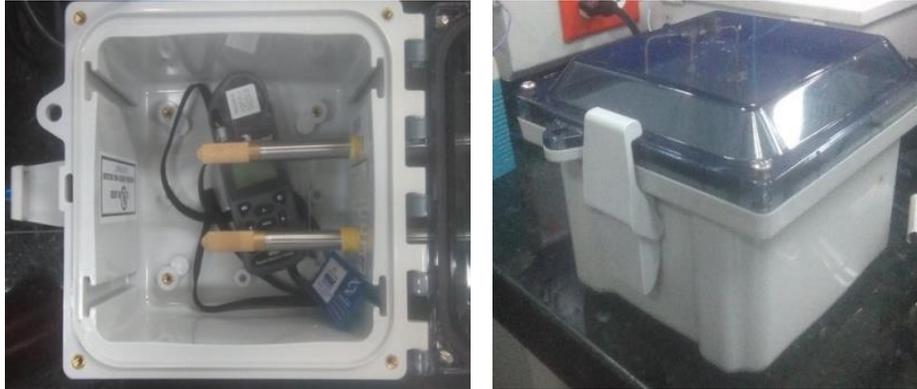
La ejecución de las pruebas de desempeño para el banco de humedad y la cámara deben seguir ciertos requerimientos estipulados la norma a utilizar para el servicio de calibración enunciada anteriormente, tomada del CEM (Centro Español de Metrología).

Basado en lo anterior, se dio inicio a las caracterizaciones con dos instrumentos termo-higrómetros patrón de marca y modelo VAISALA HMP79 y con un instrumento de medición de condiciones ambientales testigo marca y modelo KESTREL 4000. La caracterización se realizó en una cámara de calibración pequeña que se tenía dispuesta para las pruebas del generador de humedad (Ilustración 5) a distintos puntos y cada punto se inició a condiciones distintas, por ejemplo:

Medición del blanco: Se le llamó así a la medición del aire comprimido luego de pasar por los filtros y secadores con el fin de verificar cuanto era el porcentaje mínimo de humedad relativa y el tiempo en alcanzarlo en la cámara de medición. Estas mediciones se hicieron de dos maneras; la primera manera fue iniciando con humedad relativa ambiente y la segunda manera fue suministrando previamente

caudal con aire saturado durante 1 hora, sin embargo, cada prueba tubo un mínimo de duración de 3 horas.

Ilustración 5: Primera cámara de caracterización.



Fuente: Elaboración propia.

El procedimiento indica que la medición debe hacerse en ascenso y luego de un periodo de secado a los sensores para lograr una mejor estabilidad y confianza en las medidas, sin embargo, para tener comparación de los resultados y ver el comportamiento: tiempo de estabilización y puntos máximos o mínimos alcanzados, se tuvieron en cuenta diferentes maneras de caracterización; dichos puntos se enunciarán a continuación, junto con las características iniciales de medición.

Tabla 3: Puntos de caracterización del banco de humedad.

Punto de humedad medido	Prueba. N°	Características iniciales de medición
Medición del Blanco (P1)	P1.0	Humedad ambiente
	P1.1	Previo suministro aire humedo 1Hora
Medición de saturado (P2)	P2.0	Previo suministro aire seco: 1 Hora
	P2.1	Humedad ambiente
Medición al 20% (P3)	P3.0	Humedad ambiente
	P3.1	Previo suministro aire seco: 1 Hora
	P3.2	Previo suministro aire humedo 1Hora
Medición al 50% (P4)	P4.0	Humedad ambiente
	P4.1	Previo suministro aire seco: 1 Hora
	P4.2	Previo suministro aire humedo 1Hora
Medición al 80% (P5)	P5.0	Humedad ambiente
	P5.1	Previo suministro aire seco: 1 Hora
	P5.2	Previo suministro aire humedo 1Hora

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos se mostrarán por medio de gráficas que poseen dos ejes “Y”, el de la izquierda muestra los resultados en porcentajes que hacen referencia a la variación de humedades relativas registradas por los instrumentos y eficiencia, el de la derecha muestra la variación de la temperatura registrada en el saturador y la temperatura en la cámara de medición.

HR_MM: Promedio de los Patrones VAISALA (HR_MM1 & HR_MM2)

E_gen: Eficiencia de generación con respecto a la humedad esperada por la ecuación

HR_tes: Humedad relativa del instrumento testigo (KESTREL).

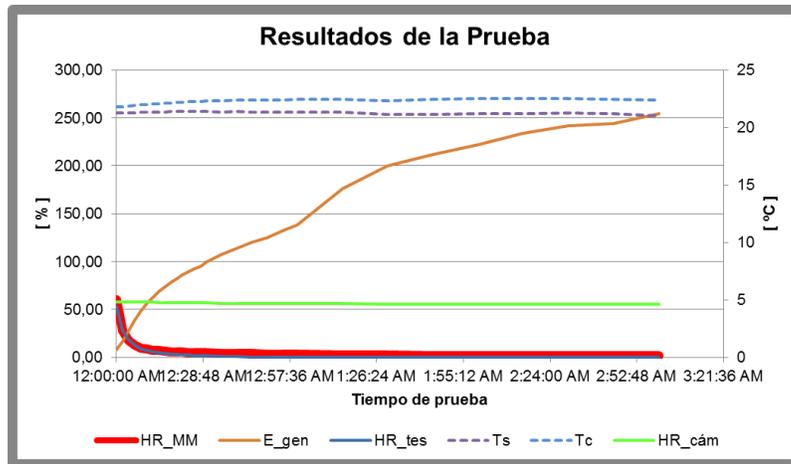
Ts: Temperatura registrada luego de la saturación.

Tc: Temperatura de la cámara (Registrada por los patrones).

HR_cam: Humedad esperada en la cámara según ecuación

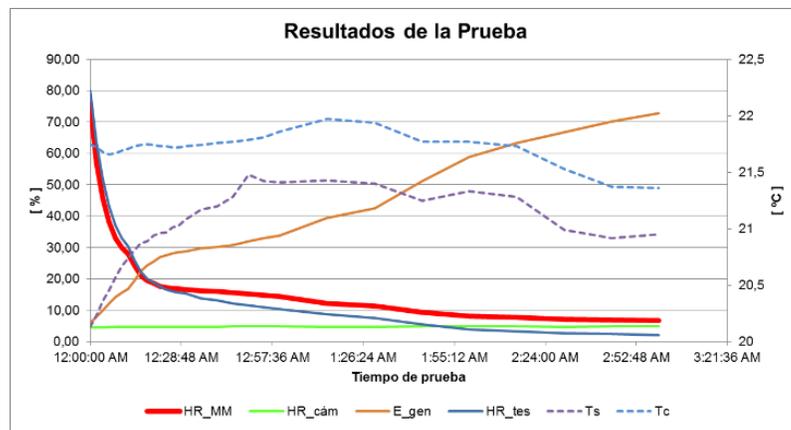
5.2.1 Caracterización del blanco.

Gráfica 1: P1.0 Medición Blanco iniciando en humedad ambiente.



Fuente: Elaboración propia.

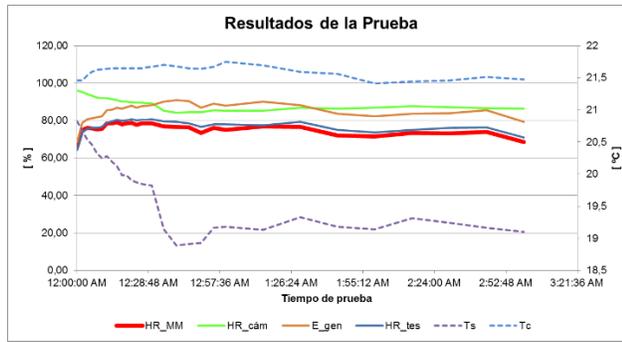
Gráfica 2: P1.1 Medición Blanco iniciando con previo suministro de aire húmedo.



Fuente: Elaboración propia.

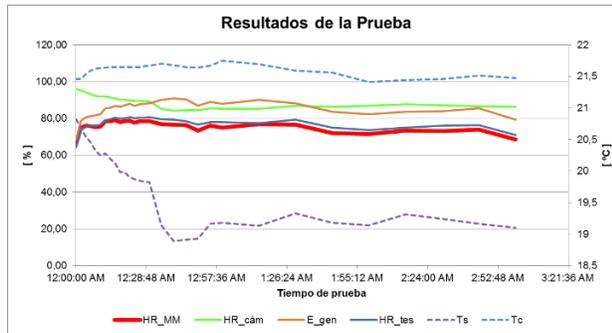
5.2.2 Caracterización del Saturado máximo

Gráfica 3: P2.0 Medición saturado iniciando con humedad ambiente.



Fuente: Elaboración propia.

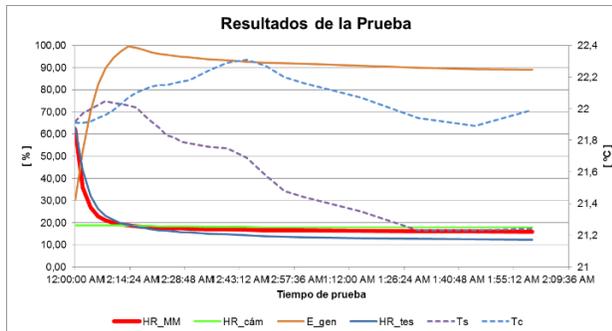
Gráfica 4: P2.1 Medición saturado iniciando con previo suministro de aire seco.



Fuente: Elaboración propia.

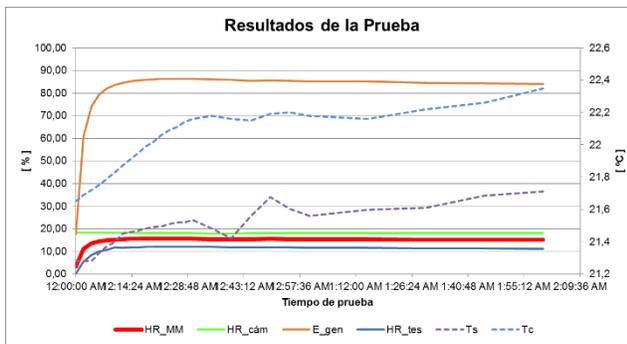
5.2.3 Caracterización al 20% humedad relativa

Gráfica 5: P3.0 Medición al 20% iniciando con humedad ambiente.



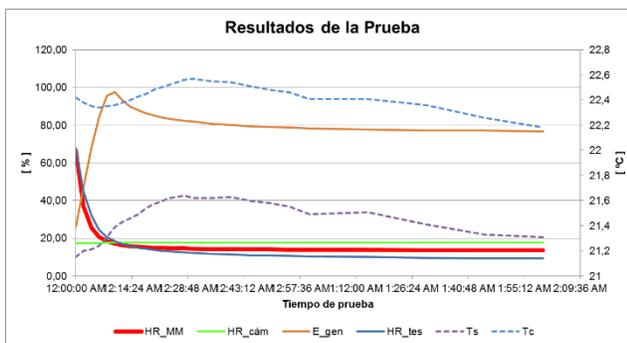
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 6: P3.1 Medición al 20% iniciando con previo suministro de aire seco.



Fuente: Elaboración propia.

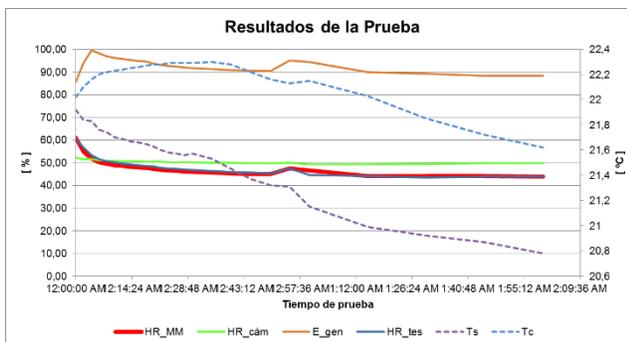
Gráfica 7: P3.2 Medición al 20% iniciando con previo suministro de aire húmedo.



Fuente: Elaboración propia.

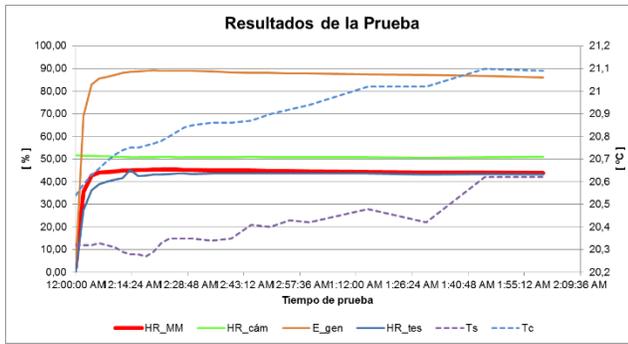
5.2.4 Medición al 50% de humedad relativa

Gráfica 8: P4.0 Medición al 50% iniciando en humedad ambiente.



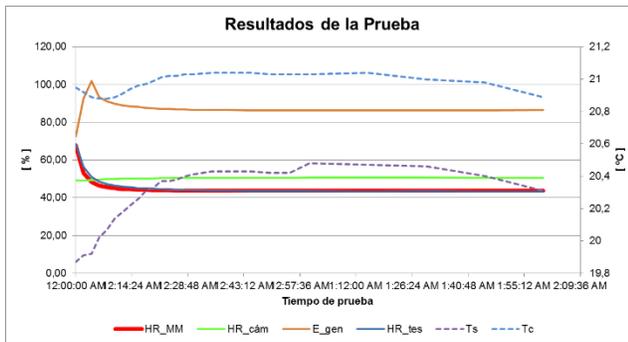
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 9: P4.1 Medición al 50% iniciando con previo suministro de aire seco.



Fuente: Elaboración propia.

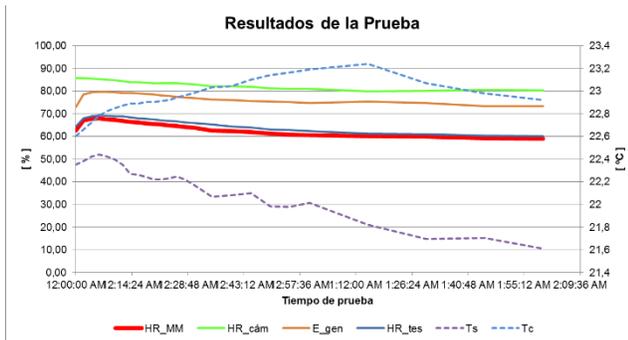
Gráfica 10: P4.2 Medición al 50% iniciando con previo suministro de aire húmedo.



Fuente: Elaboración propia.

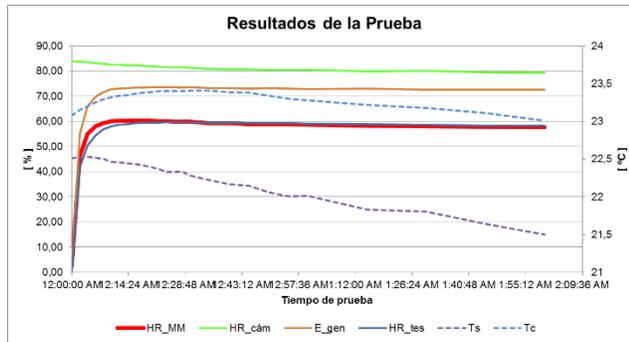
5.2.5 Medición al 80% de humedad relativa

Gráfica 11: P5.0 Medición al 80% iniciando en humedad ambiente.



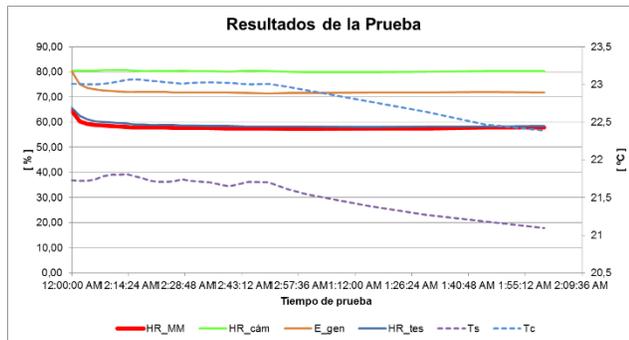
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 12: P5.1 Medición al 80% iniciando con previo suministro de aire seco.



Fuente: Elaboración propia.

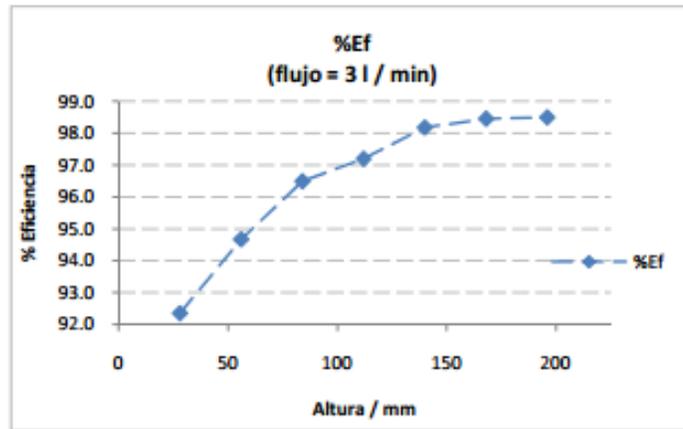
Gráfica 13: P5.2 Medición al 80% iniciando con previo suministro de aire húmedo.



Fuente: Elaboración propia.

Los anteriores fueron los resultados obtenidos de las primeras pruebas realizadas, en estos resultados se demostró que el generador no lograba llegar a una humedad relativa mayor al 78% aproximadamente, según los datos mostrados por los patrones, para lo cual, se procedió a repetir las mediciones disminuyendo el caudal suministrado hacia el saturador.

Lo anterior se pensó basado en uno de los documentos investigados, donde muestran que la eficiencia del saturador mejora con la altura del agua dentro del mismo; esto llevó a inferir que mientras más tiempo pudiera estar el aire en contacto con el agua, logra obtener más vapor de agua. **Gráfica 14:** Eficiencia del saturador con respecto a la altura del agua



Fuente: DAVILA Y JUÁREZ, Jesús. Nadia. Diseño y construcción de un sistema de generación de humedad por flujo dividido. En: Simposio de metrología (CENAM). [En línea]. Vol 2. N°5 (2010). [Consultado 23 Mar. 2018]. Disponible en < <https://www.cenam.mx/sm2010/info/pviernes/sm2010-vp02b.pdf>>.

La explicación de lo inferido anteriormente se puede entender desde la ecuación de caudal.

$$Q = VA \quad (2)$$

Dónde:

Q= Caudal

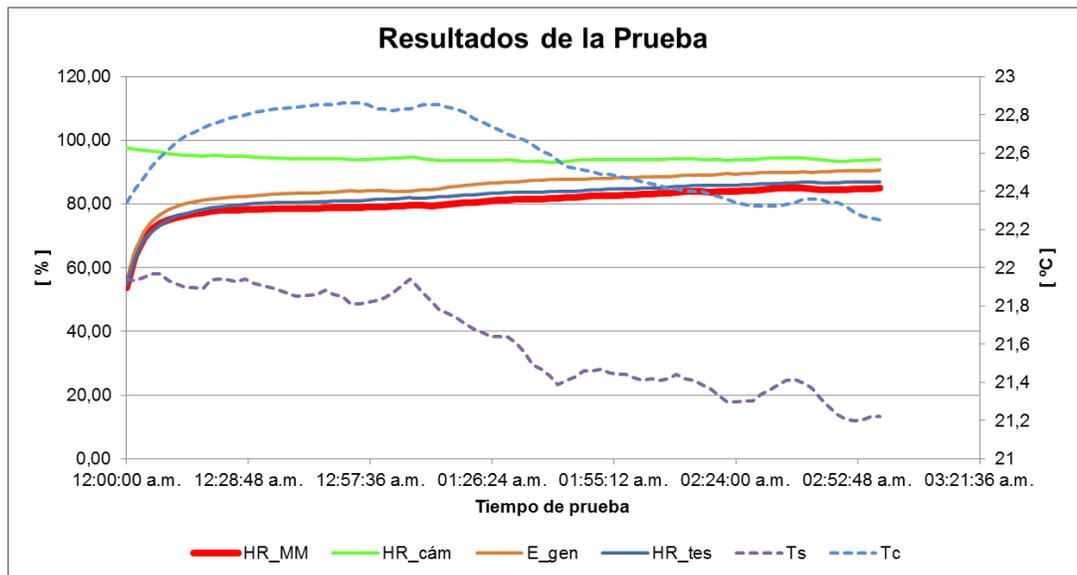
V= Velocidad del fluido

A= Área transversal por donde atraviesa el fluido

Debido a que el área transversal del saturador es constante, al disminuir el caudal lo que se está disminuyendo es la velocidad del aire, permitiendo que éste se quede más tiempo dentro del saturador y pueda absorber mayor cantidad de vapor de agua.

Los resultados obtenidos de la nueva medición del punto saturado fueron los siguientes:

Gráfica 15: Medición del saturado con bajo caudal de aire.



Fuente: Elaboración propia.

La caracterización demostró que el concepto teórico inferido funcionó en su aplicación, logrando llegar hasta humedad relativa máxima de 85,11% y continuaba en aumento; sin embargo, el tiempo que requiere el generador para llegar a esas proporciones en un volumen de cámara pequeño fue de 3 horas, lo cual es bastante demorado aún, por lo que se tiene pensado implementar un control de temperatura ya sea en la cámara disipando calor, o en el saturador añadiendo alguna fuente de calor.

5.2.6 Caracterización de la incubadora 23IC. La cámara que se ha dispuesto para la realización de las pruebas de funcionamiento presenta el problema de ser muy pequeña para cumplir con los requisitos que exige la norma de calibración de termo-higrómetros, para lo cual, se propuso diseñar una nueva cámara con un volumen más grande; sin embargo, en vista de que ya se posee una cámara aparte, con la que se pretende generar calor y realizar la calibración de temperatura específicamente, se planteó otra estrategia. Probar el comportamiento de temperatura y humedad de la incubadora 23IC (Ilustración 6) y verificar si es posible trabajar con ésta para ambos procesos, lo anterior se realizó de dos maneras, una sin suministro de aire generado por el banco y la otra con suministro de aire; los resultados y los significados de las leyendas se muestran a continuación.

T_Cam= Temperatura de generación mostrada en el indicador de la cámara de temperatura.

T_Kes13= Temperatura del indicador Kestrel identificado en la corporación con la serie SL-013.

T_Kes15= Temperatura del indicador Kestrel identificado en la corporación con la serie SL-015.

T_RTD_Cam= Temperatura indicada por la RTD introducida en la cámara.

HR_Kes13= Humedad del indicador Kestrel identificado en la corporación con la serie SL-013.

HR_Kes15= Humedad del indicador Kestrel identificado en la corporación con la serie SL-015.

Ilustración 6: Incubadora BEAR 23IC.

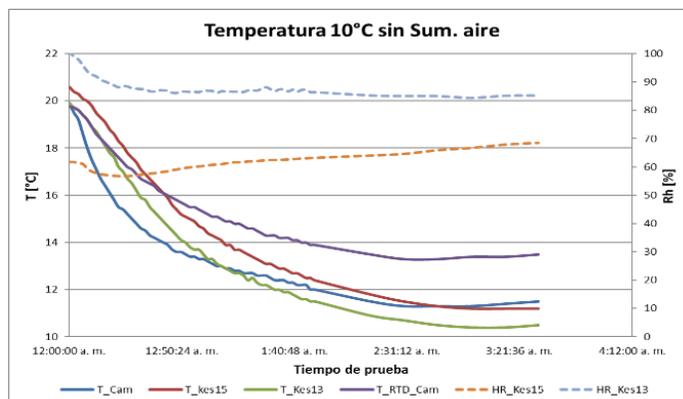


Fuente: REVITEQ SCIENTIFIC EQUIPMENT. En línea. Disponible en

<<https://reviteq.com/products/bear-incubator-23i>>.

5.4.1.1 Caracterización de temperatura sin suministro de aire

Gráfica 16: Medición de generación al punto 10 °C en la cámara sin suministro de aire.



Fuente: Elaboración propia.

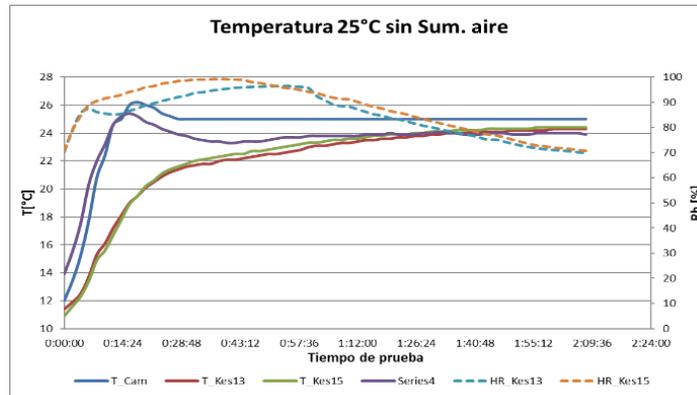
T_Cam (min): 11,5 °C; **T_Kes15 (min):** 11,2 °C; **T_Kes13:** 10,5°C;

T_RTD_Cam (min): 13,5 °C; $\Delta_{max}HR_Kes13=$ 11,6 %; $\Delta_{max}HR_Kes15:$ 11,9 %

En esta primera caracterización con la cámara generadora de temperatura es notable ver en las leyendas que no se logró estabilidad en las temperaturas, ni en las humedades; se debió principalmente a que la cámara presenta dificultad para bajar las temperaturas, ya que depende mucho de que las condiciones ambientales donde esté ubicada la incubadora se encuentren máximo 8 °C por encima del punto deseado.

Por lo que para un punto de 10 °C se necesita tener la condición de temperatura ambiente en un máximo de 18°C y estas deben ser muy bien controladas ya que las variaciones afectan el ciclo de enfriamiento interno de la cámara impidiendo llegar al punto deseado; es importante resaltar que estas mediciones pueden no ser muy certeras debido al error que presentan las RTD y los instrumentos de condiciones ambientales “KESTREL” con los que se realizó esta caracterización.

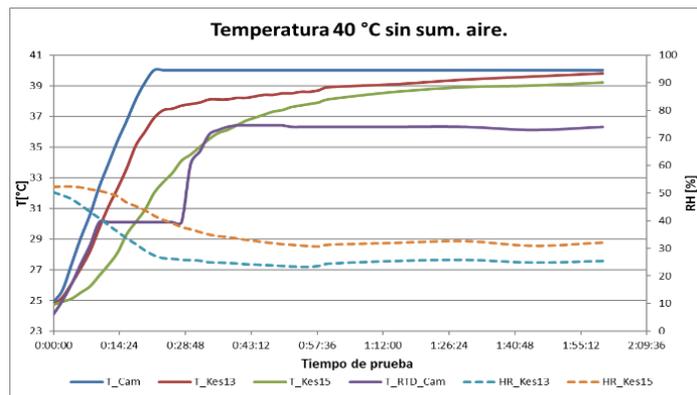
Gráfica 17: Medición de generación al punto 25°C sin suministro de aire.



Fuente: Elaboración propia.

T_Cam (max): 25 °C; T_Kes15 (max): 24,4 °C; T_Kes13 (max): 24,3 °C;
T_RTD_Cam (max): 24 °C; $\Delta_{max}HR_Kes13= 26,6 \%$; $\Delta_{max}HR_Kes15: 28,5$

Gráfica 18: Medición de generación al punto 40 °C sin suministro de aire.



Fuente: Elaboración propia.

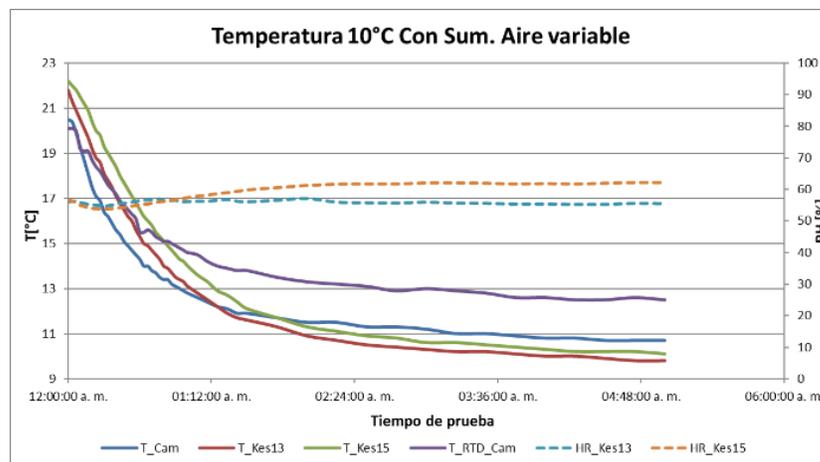
T_Cam (max): 40 °C; T_Kes15 (max): 39,2 °C; T_Kes13 (max): 39,8 °C;
T_RTD_Cam (max): 36,3 °C; $\Delta_{max}HR_Kes13= 27 \%$; $\Delta_{max}HR_Kes15: 21,7 \%$

Las anteriores gráficas mostraron por medio de varios sensores, que la cámara, en efecto, tiene la facilidad funcional de generar la temperatura deseada, y también de mantenerla relativamente constante (dentro de los parámetros aceptados por la norma), sin embargo, es notable que la humedad dentro de la cámara, varía mucho más de los límites permitidos, para lo cual, como se dijo anteriormente, fue

necesario probar y esperar un mejor comportamiento con el suministro de aire a condición requerida.

5.4.1.2 Caracterización de temperatura con suministro de aire variable. En primera instancia se empezó a experimentar con suministro de aire variable para posteriormente definir un el ajuste de los rotámetros en un punto de constante de generación de humedad, los resultados se muestran a continuación. Los rotámetros muestran pueden ser ajustados en nivel de altura [mm], sin embargo, estos niveles fueron previamente calibrados y tienen una escala equivalente en unidades de [cm³/min].

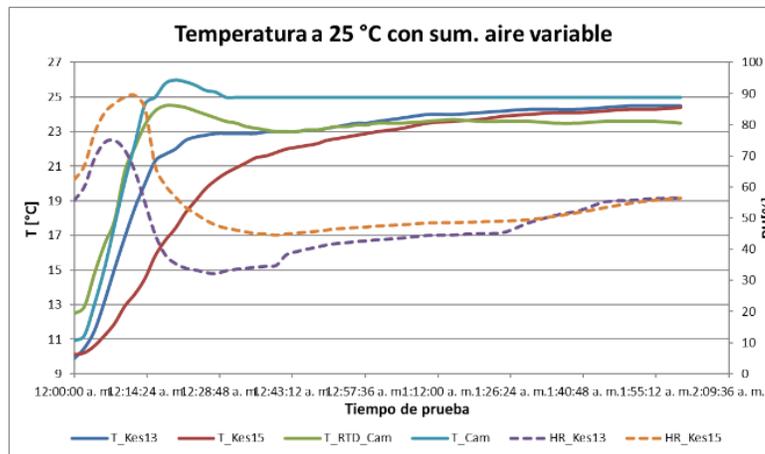
Gráfica 19: Medición de generación al punto 10 °C con suministro de aire variable.



Fuente: Elaboración propia.

T_Cam (min): 10,7 °C; T_Kes15 (min): 10,1 °C; T_Kes13: 9,8°C;
T_RTD_Cam (min): 12,5 °C; $\Delta_{max}HR_Kes13= 2,9 \%$; $\Delta_{max}HR_Kes15: 8,5 \%$

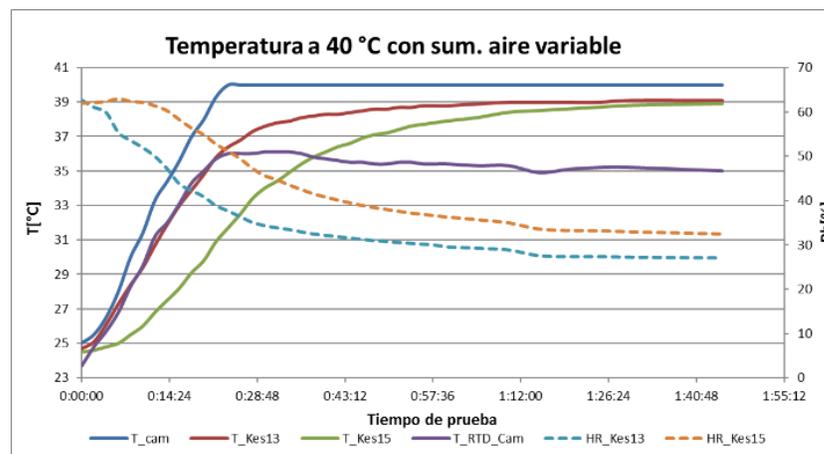
Gráfica 20: Medición de generación al punto 25 °C con suministro de aire variable.



Fuente: Elaboración propia

T_Cam (max): 25 °C; T_Kes15 (max): 24,4 °C; T_Kes13 (max): 24,5 °C;
T_RTD_Cam (max): 23,6 °C; $\Delta_{max}HR_Kes13= 42,9 \%$; $\Delta_{max}HR_Kes15: 45 \%$

Gráfica 21: Medición de generación al punto 40 °C con suministro de aire variable.

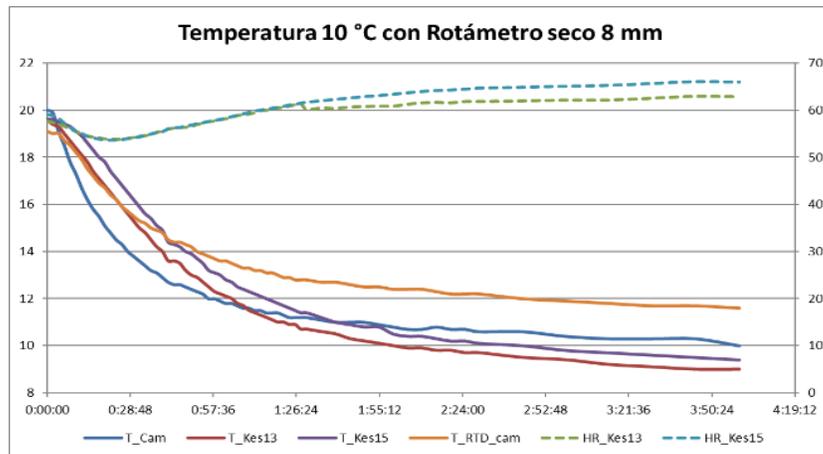


Fuente: Elaboración propia.

T_Cam (max): 40 °C; T_Kes15 (max): 38,9 °C; T_Kes13 (max): 39,1 °C;
T_RTD_Cam (max): 35,2 °C; $\Delta_{max}HR_Kes13= 35,4 \%$; $\Delta_{max}HR_Kes15: 30,4 \%$

5.4.1.3 Caracterización de temperatura con suministro de aire constante.

Gráfica 22: Medición de generación al punto 10 °C con suministro de aire constante.

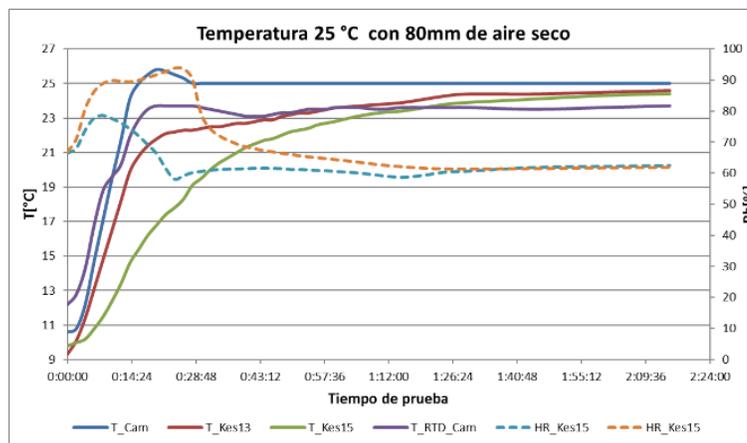


Fuente: Elaboración propia.

T_Cam (min): 10 °C; T_Kes15 (min): 9 °C; T_Kes13: 9,4°C;

T_RTD_Cam (min): 11,6 °C; $\Delta_{max}HR_{Kes13}$ = 9,2 %; $\Delta_{max}HR_{Kes15}$: 12,5

Gráfica 23: Medición de generación al punto 25 °C con suministro de aire constante.

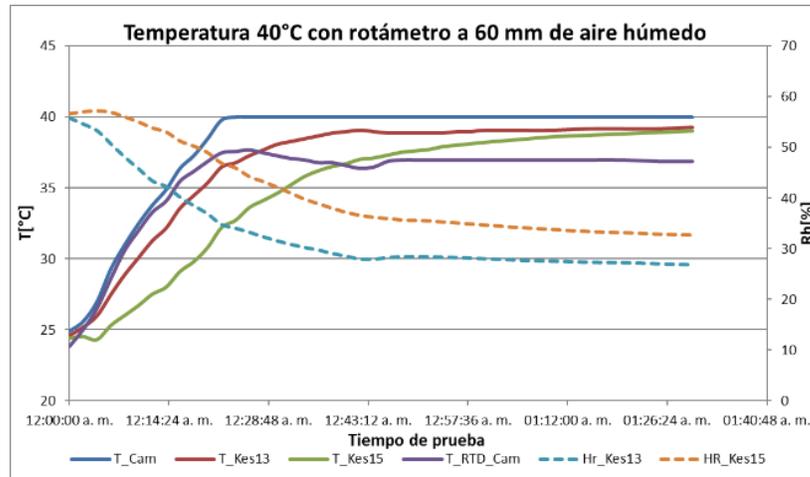


Fuente: Elaboración propia.

T_Cam (max): 25 °C; T_Kes15 (max): 24,4 °C; T_Kes13 (max): 24,6 °C;

T_RTD_Cam (max): 23,7 °C; $\Delta_{max}HR_{Kes13}$ = 20,5 %; $\Delta_{max}HR_{Kes15}$: 32,5 %

Gráfica 24: Medición de generación al punto 40 °C con suministro de aire constante.



Fuente: Elaboración propia.

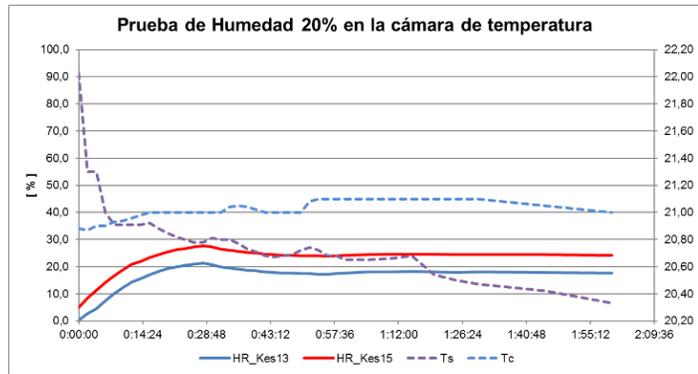
T_Cam (max): 40 °C; T_Kes15 (max): 39 °C; T_Kes13 (max): 39,3 °C;

T_RTD_Cam (max): 36,9 °C; $\Delta_{max}HR_Kes13= 28,9 \%$; $\Delta_{max}HR_Kes15: 24,6 \%$

Los resultados fueron poco más favorables, sin embargo, existen aún percances para mantener la humedad constante, ya que la velocidad de la cámara para secar su interior o para humedecerlo, varía conforme la temperatura vaya aumentando o disminuyendo, y para el caso de la generación del punto de 40 °C, el banco generador de humedad, no logra contrarrestar el secado que la cámara hace en su interior.

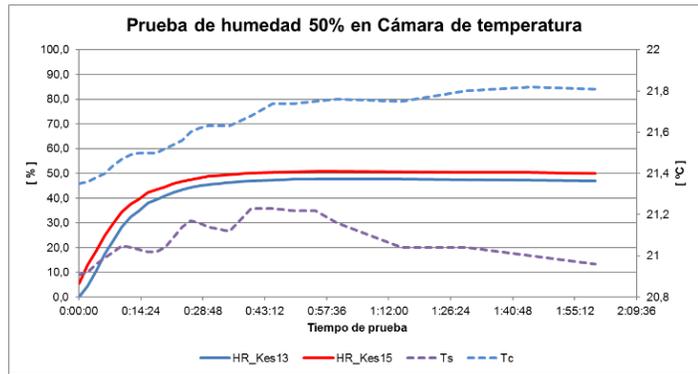
5.4.1.4 Caracterización de humedad en la incubadora 23IC. Se procedió a caracterizar los puntos de 20% 50% y 80% en la cámara de temperatura y comparar con los resultados en la anterior cámara de pruebas, para ver si había reproducibilidad, la medición en los 3 puntos se hizo principalmente sin tener control en la temperatura de la cámara y luego se probó controlando dicha temperatura para analizar como respondía bajo condiciones más controladas.

Gráfica 25: Medición de humedad al 20% en incubadora 23IC .



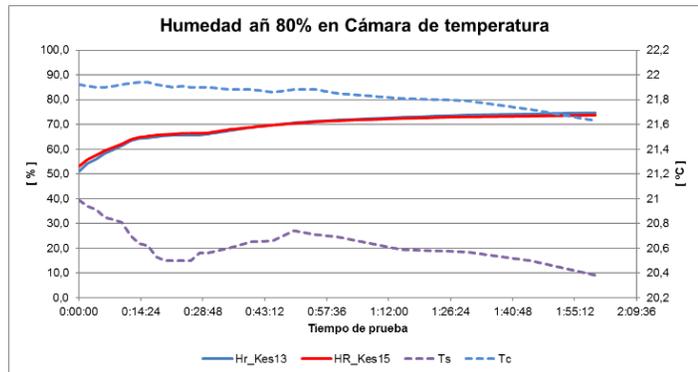
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 26: Medición de humedad al 50% en incubadora 23IC.



Fuente: Elaboración propia.

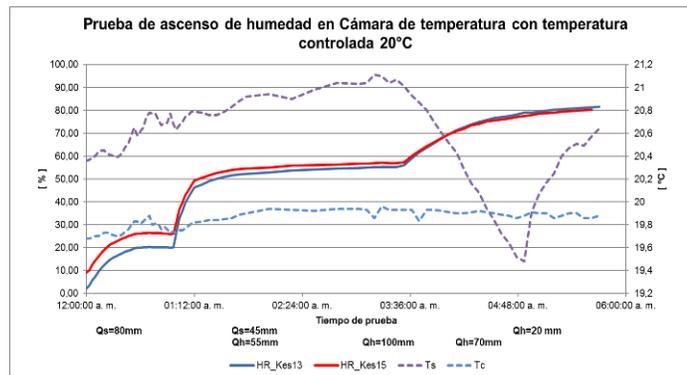
Gráfica 27: Medición de humedad al 80% en incubadora 23IC.



Fuente: Elaboración propia.

Los puntos de calibración deseados fueron alcanzados, sin embargo, aún existe el problema de velocidad en el alcance de dichos puntos, cada uno tiende a demorar entre 1 hora y 1 hora y media, esto se pudo mitigar un poco con la condición de control en la temperatura de la incubadora a 20°C, la cual es la condición de calibración de los patrones VAISALA.

Gráfica 28: Humedad en los 3 puntos con temperatura controlada en la incubadora 231C.



Fuente: Elaboración propia.

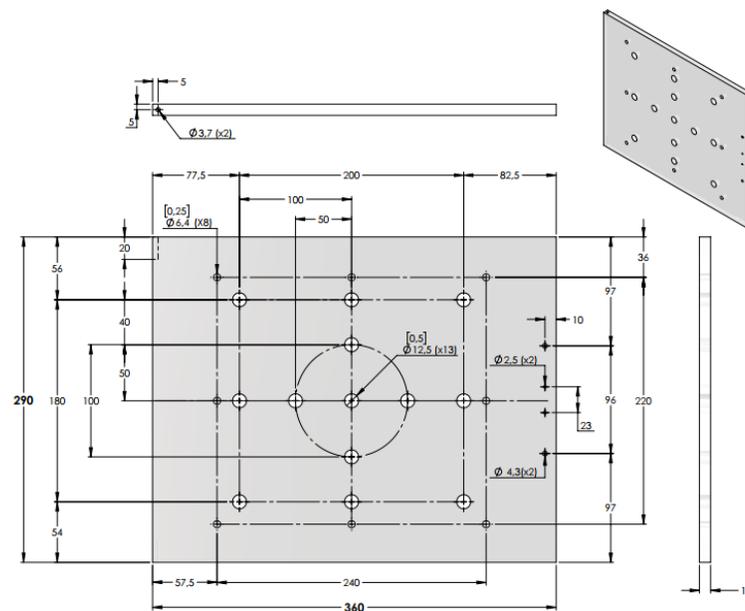
Se pudo ver un cambio en el tiempo de calibración, debido a que, al no tener la temperatura controlada en la cámara, demoraba un poco más en alcanzar la estabilidad de los puntos y el tiempo de calibración total era más extendido, aproximadamente 30 minutos o 1 hora más; sin embargo, el tiempo de calibración sigue siendo mucho y no es muy rentable prestar un servicio tan demorado ya que limita la cantidad de instrumentos que se pueden calibrar en el periodo de tiempo requerido, por lo tanto, es imprescindible aumentar la velocidad para alcanzar los puntos de humedad y lograr estabilizarlos, esto se puede lograr teóricamente aumentando la temperatura en el agua del saturador, ya que de esta manera el agua puede liberar más fácil el vapor para ser absorbido por el aire que circula por dentro.

5.4.1.5 Modificación de la tapa de la incubadora BEAR 231C. La caracterización anterior también tuvo como fin verificar si era posible lograr los alcances de calibración en un nuevo volumen de control, y poder utilizar el mismo medio para calibrar los

mensurados deseados; debido a que se encontraron resultados comparables se procedió a diseñar una nueva tapa que se ajustara a la incubadora con variedad de agujeros, esto con el fin de encontrar dentro del medio, el volumen de calibración, que según la norma, generalmente se encuentra en el medio del volumen, sin embargo, se especifica que debe estar previamente caracterizado para ser comprobado y obtener rangos y valores clave para la estimación de incertidumbre de calibración que definan un comportamiento adecuado de medición.

El diseño de la nueva tapa se hizo en SolidWorks y se mandó a fabricar en la empresa LASER-MAC SAS ubicada en Bucaramanga, el plano se muestra a continuación.

Ilustración 7: Plano de la tapa para la cámara de temperatura.



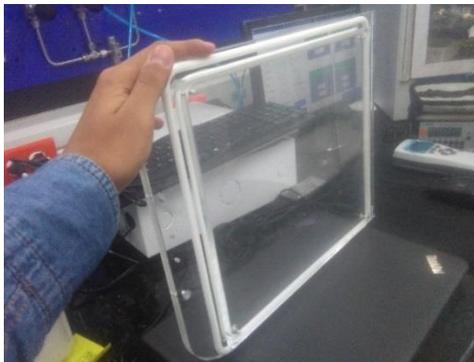
Fuente: Jhon Alfonso. Corporación CDT de GAS.

La tapa original consta de dos láminas de acrílico sujetas entre ellas con tornillos, donde la segunda lámina es más pequeña y tiene las medidas del agujero de la incubadora, además, la lámina más grande tiene un canaleta donde tiene insertado

un cordón de goma, estas dos partes cumplen la función de hacer la cámara un poco más hermética.

Por cuestiones de practicidad, economía y disponibilidad de tiempo no se mandó a realizar el canaleta ni la segunda lámina, sin embargo, para compensar un poco el sellado que se pierde con la nueva tapa, se adhirió un empaque de neopreno en el lugar donde debía ir ubicado el cordón.

Ilustración 8: Tapa original de la incubadora BEAR 23IC.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 9: Nueva tapa de caracterización para la incubadora BEAR 23IC.



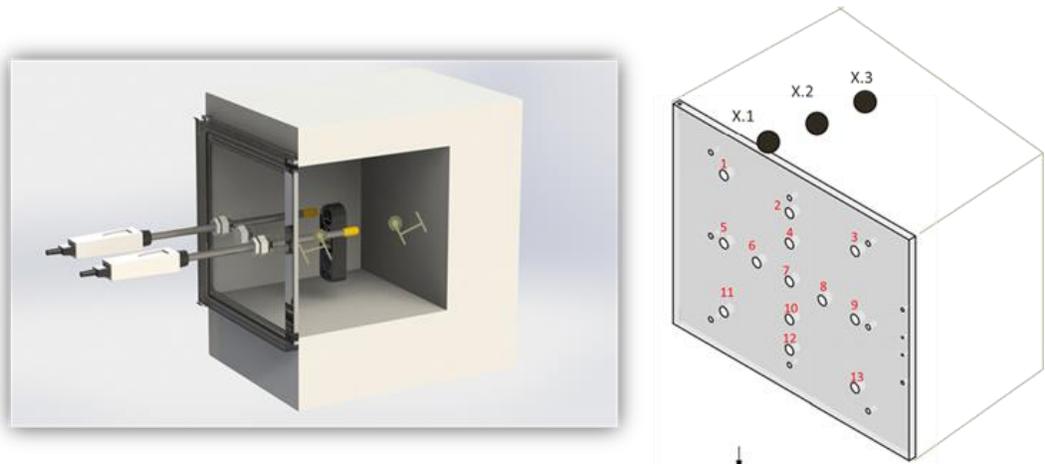
Fuente: Elaboración propia.

5.4.1.6 Caracterización de uniformidad y estabilidad de humedad en incubadora BEAR 23IC. Para realizar la estimación de la incertidumbre deben estar la uniformidad y la estabilidad en la cámara; además el procedimiento normalizado

guía TH-007, especifica que el medio de calibración debe estar previamente caracterizado en estos parámetros.

La caracterización de la cámara es un proceso que consta de realizar mediciones de estabilidad y uniformidad en todo el volumen de la cámara, por lo que se establecieron 13 agujeros de caracterización a lo largo y ancho del área frontal de la cámara con uno de los instrumentos patrón posicionado en el agujero del centro (agujero 7) a media profundidad, sin cambiar su posición y el segundo instrumento patrón midiendo los demás agujeros, además, variando la profundidad de inmersión de este patrón en 3 posiciones del sensor: 3 cm separado de la tapa (X.1), en el medio (X.2) y 3 cm separado del fondo(X.3); es decir, un total de 9 mediciones por agujero (considerando que estas se hacen en los 3 puntos del intervalo de calibración 20% hr, 50% hr, 80% hr); la Ilustración 10: Puntos de caracterización del volumen de la cámara. muestra cómo se distribuyeron estos puntos.

Ilustración 10: Puntos de caracterización del volumen de la cámara.



Fuente: CDT DE GAS.

El registro de datos en el agujero ubicado en el medio de la tapa, se realizó con el fin de tener un dato de referencia, debido a que usualmente la zona de calibración

tiende a estar en la mitad de la cámara o medio de calibración, alejada de las paredes y/o sumideros de calor.

Tabla 4: Resultados de uniformidad y estabilidad en el punto medio (P.7) de la tapa.

20%			
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	Profundidad 3 cm del acrílico	
25,25	20,34	DESV. EST RH	0,011595018
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	Profundidad media	
26,41	19,57	DESV. EST RH	0,01779513
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	Profundidad 3 cm del fondo	
26,49	19,26	DESV. EST RH	0,023593784
50%			
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	Profundidad 3 cm del acrílico	
46,80	19,72	DESV. EST RH	0,017919573
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	Profundidad media	
49,32	19,35	DESV. EST RH	0,021628171
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	Profundidad 3 cm del fondo	
49,27	19,13	DESV. EST RH	0,038005848
80%			
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	Profundidad 3 cm del acrílico	
79,66	19,65	DESV. EST RH	0,009189366
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	Profundidad media	
78,93	19,49	DESV. EST RH	0,023593784
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	Profundidad 3 cm del fondo	
75,89	20,06	DESV. EST RH	0,071250731

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5: Resultados caracterización de uniformidad puntos (7/8).

20%		20%	
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.8.1 [°C]
19,76	19,58	18,69	19,58
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.8.2 [°C]
19,27	19,56	19,36	19,56
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.8.3 [°C]
19,61	19,66	20,24	19,66
50%		50%	
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.8.1 [°C]
50,82	19,35	51,58	19,35
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.8.2 [°C]
50,80	19,58	50,94	19,58
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.8.3 [°C]
50,68	19,71	51,40	19,71

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6: Resultados caracterización de uniformidad puntos (7/6).

20%		20%	
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.6.1 [°C]
21,03	20,11	20,86	20,11
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.6.2 [°C]
20,34	19,99	20,28	19,99
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.6.3 [°C]
21,41	20,15	21,41	20,15
50%		50%	
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.6.1 [°C]
49,71	19,86	51,55	19,86
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.6.2 [°C]
50,20	19,89	49,48	19,89
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.6.3 [°C]
50,10	19,89	50,28	19,89

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7: Resultados caracterización de uniformidad puntos (7/10).

20%		20%	
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.1 0.1[°C]
19,56	20,05	19,78	20,05
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.1 0.2[°C]
19,97	20,12	19,90	20,12
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.1 0.3[°C]
19,80	20,15	19,69	20,15
50%		50%	
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.1 0.1[°C]
50,99	20,16	51,58	20,16
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.1 0.2[°C]
50,53	20,03	50,44	20,03
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.1 0.3[°C]
50,74	20,12	50,33	20,12

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8: Resultados caracterización de uniformidad puntos (7/12).

20%		20%	
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.12.1 [°C]
22,11	20,09	22,15	20,09
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.12.2 [°C]
21,86	20,09	21,77	20,06
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.12.3[°C]
22,02	20,18	21,89	20,18
50%		50%	
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.12.1 [°C]
49,79	19,88	52,24	19,88
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.12.2 [°C]
50,17	19,97	50,14	19,97
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.12.3 [°C]
50,43	19,94	49,83	19,94

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9: Resultados caracterización de uniformidad puntos (7/5).

20%		20%	
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.5.1 [°C]
19,69	19,99	19,93	19,99
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.5.2 [°C]
20,67	19,82	20,69	19,82
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.5.3 [°C]
20,57	20,00	20,53	20,00
50%		50%	
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.5.1 [°C]
49,99	19,90	50,32	19,90
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.5.2 [°C]
50,48	19,98	50,42	19,98
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.5.3 [°C]
50,05	19,93	50,20	19,93

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10: Resultados caracterización de uniformidad puntos (7/4).

20%		20%	
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.4.1 [°C]
19,69	19,71	19,94	19,71
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.4.2 [°C]
20,19	19,98	20,25	19,98
RH P.7 [%]	T P.7 [°C]	RH P.7 [%]	T P.4.3 [°C]
20,77	20,01	20,86	20,01

Fuente: Elaboración propia.

Las caracterizaciones de uniformidad solo se pudieron hacer en los puntos de 20% y 50% de humedad relativa debido a que el generador se vio impedido para llegar al punto de 80% debido a que la condición de temperatura en el laboratorio se volvió más baja debido a que se empezó a encender un segundo aire acondicionado, el cual se usa para servicios de calibración de temperatura, donde los equipos necesitan llegar a puntos bajo cero y sus condiciones ambientales requieren ser más bajas.

El aire acondicionado secundario ventila directamente hacia la tubería posterior al saturador del banco de generación y baja la temperatura en el proceso de saturado aproximadamente a 18 °C; esto implica que la humedad absoluta del aire en ese

punto es menor que la humedad absoluta en la cámara que se encuentra a 20° C, por lo tanto se hace más complicado que el aire en el saturador pueda absorber una cantidad de humedad suficiente para obtener humedad relativa de 80% en la cámara.

Se propone la idea de calentar un poco el agua para que libere un poco más de vapor y cuando el aire entre en contacto con ella, suba su temperatura y absorba un poco más de ese vapor, para lo cual se propone usar una cinta térmica. El calentamiento debía ser superior a la temperatura de la cámara pero algo mínimo para que al pasar por la manguera de suministro hacia esta, el vapor de agua no se condense y entre líquido a la cámara, por lo tanto, se pensó en calentar hasta un máximo de 23 °C y con ese dato se hizo el cálculo para estimar la potencia requerida por la cinta de térmica para la masa de agua en el saturador; para el cálculo se usó la siguiente ecuación:

$$Q = m * Cp * (Tf - Ti)$$

Dónde:

Q=Energía requerida [J].

m= Masa del fluido a calentar. [kg]

Cp= Calor específico del fluido [J/kg*k].

Tf= Temperatura final o requerida del fluido [°K].

Ti= Temperatura inicial del fluido [°K].

El cálculo se realizó estimando un tiempo de calentamiento de 60 segundos con una eficiencia eléctrica de 90% para sobredimensionar el resultado y tener un poco más de seguridad en la energía necesaria de calentamiento para esa masa de agua.

Tabla 11: Datos y cálculo de la energía requerida de calefacción.

Cp Agua	4186	J/g°C
Densidad	1	g/cm3
Masa	0,54978	kg
Volumen	549,78	cm3
Longitud columna de agua	28	cm
Radio Columna de agua	2,5	cm
Tf	23	°C
Ti	19,5	°C
q	8054,82678	J
Tiempo	60	s
Q	134,247113	W
Q(eff=0,9)	149,163459	W

Fuente: Elaboración propia.

Se eligió una cinta de silicona marca BRISKHEAT con potencia de 150 Watts, se muestra a continuación la imagen del producto y sus especificaciones.

Ilustración 11: Cinta de calefacción para el saturador.



Click image to open expanded view

BriskHeat
BriskHeat GBH0250-1 Beaker Heater Jacket with Velcro Fastener for 250mL Griffin Beaker Diameter: 2.7-Inch, Height: 3-Inch, Width: 12.25-Inch (without Controller), 120VAC
Be the first to review this item

Price: **\$81.36** + \$75.60 shipping
New (6) from \$82.00 & FREE shipping.

Specifications for this item

Part Number	GBH0250-1	Material	Silicone Rubber
Number of Items	1	Model Number	GBH0250-1
Brand Name	BriskHeat	UNSPSC Code	41121803
Capacity	250.0 milliliters	Wattage	150 watts
Height	3 inches	Width	12-1/4 inches

[See more product details](#)

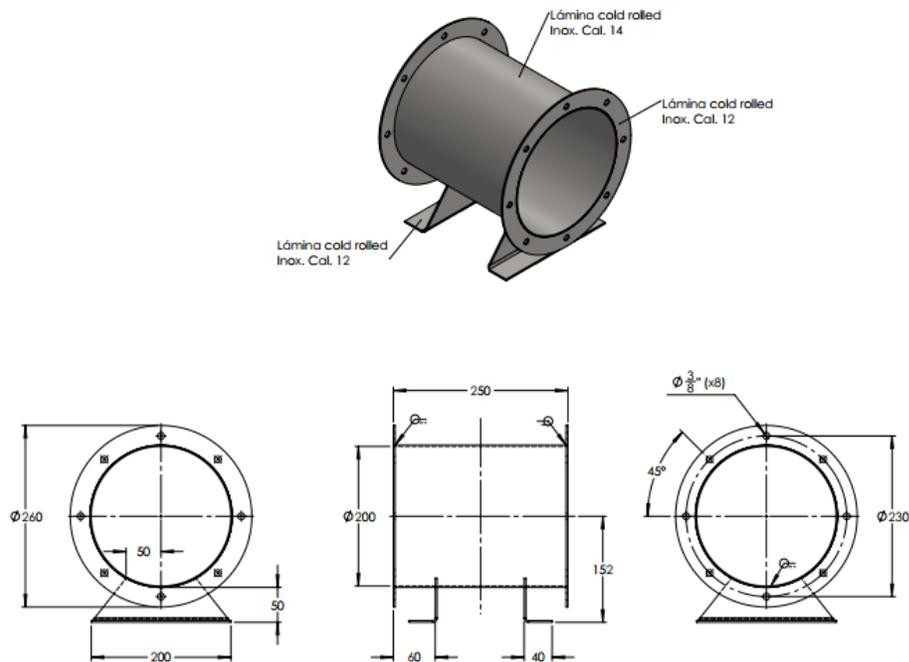
Fuente: Amazon. En línea. Disponible en

<https://www.amazon.com/gp/product/B0095ZIUZ8/ref=ox_sc_act_title_4?smid=A3MJWKSFFDUCAG&psc=1>.

Existen diferentes tipos de cintas, cables y mantas de calefacción que ofrece el mismo fabricante, sin embargo, se eligió específicamente esta, debido a que en las especificaciones del material del saturador indica que la máxima temperatura que soporta es de 125 °F (52 °C), razón por la cual se opta por ubicar la cinta únicamente en el área de metal de los recipientes de saturación, y este producto fue el más cercano a cumplir con las condiciones dimensionales para la necesidad.

Se decidió cambiar la cámara de calibración de humedad por una con un volumen menor, con el fin de disminuir el tiempo de estabilización y verificar si se lograba alcanzar nuevamente una humedad relativa de 80% bajo las condiciones del laboratorio, por lo que se realizó el diseño de esta en la herramienta de modelación SolidWorks, la Ilustración 12 muestra los planos de fabricación.

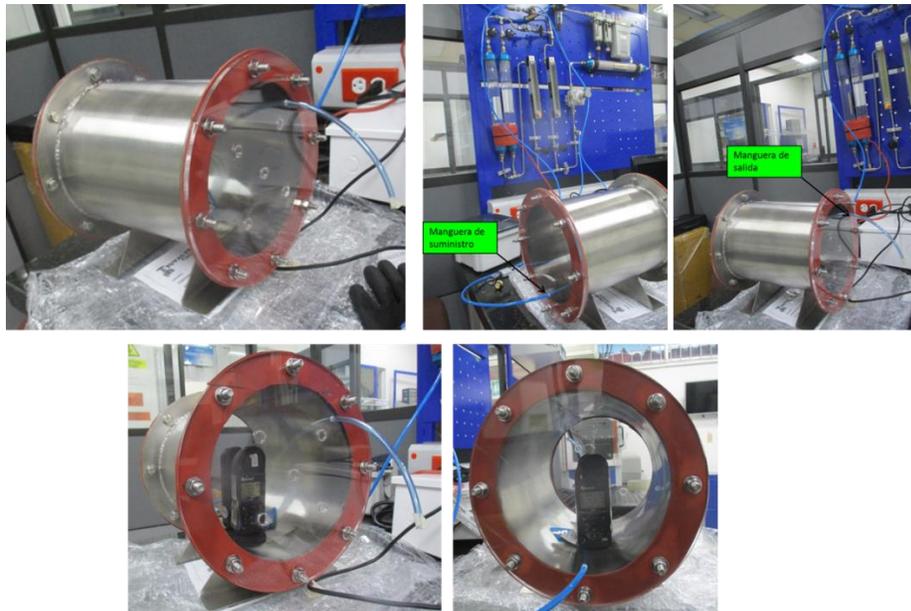
Ilustración 12: Planos de fabricación cámara de humedad.



Fuente: Jhon Alfonso. Corporación CDT de Gas.

El resultado de la fabricación de la cámara se visualiza en la Ilustración 13, la cámara se acomodó para el fin con unos empaques hechos de material neopreno para evitar la fuga de humedad por lugares indeseados. Se modelaron y fabricaron también un conjunto de tapas, las cuales poseen unos agujeros distribuidos uniformemente para el mismo fin de realizar la caracterización de la cámara en todo su volumen. Sin embargo, no se logró realizar esta caracterización dentro del tiempo definido de la práctica debido a que ese momento los instrumentos patrón se encontraban en el laboratorio VAISALA renovando su calibración, para cuando llegaron, se procedió a realizar la caracterización de temperatura en la incubadora.

Ilustración 13: Fabricación de la cámara de calibración de humedad.



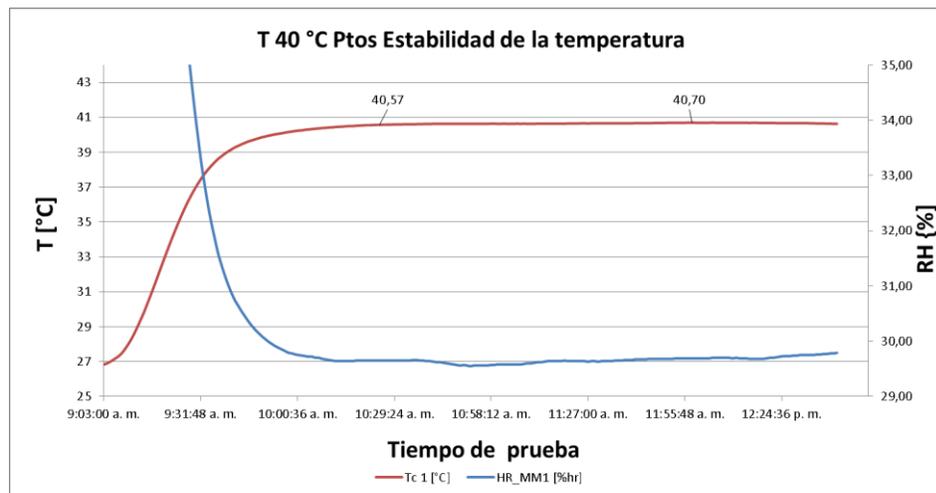
Fuente: Corporación CDT de GAS.

5.2.6.1 Caracterización estabilidad y uniformidad de la temperatura en Incubadora 23IC.

La primera prueba en realizarse consistió en configurar la incubadora a 40°C y tomar las mediciones en el agujero del centro (7), desde el inicio de la configuración hasta

un mínimo de 3 horas después para verificar la variación que presentaba durante este lapso de tiempo, esta prueba se realizó de igual manera para las otras temperaturas del intervalo de calibración (25 °C y 10°C), los resultados se muestran a continuación.

Gráfica 29: Curva de estabilidad de la temperatura en la incubadora a 40°C.



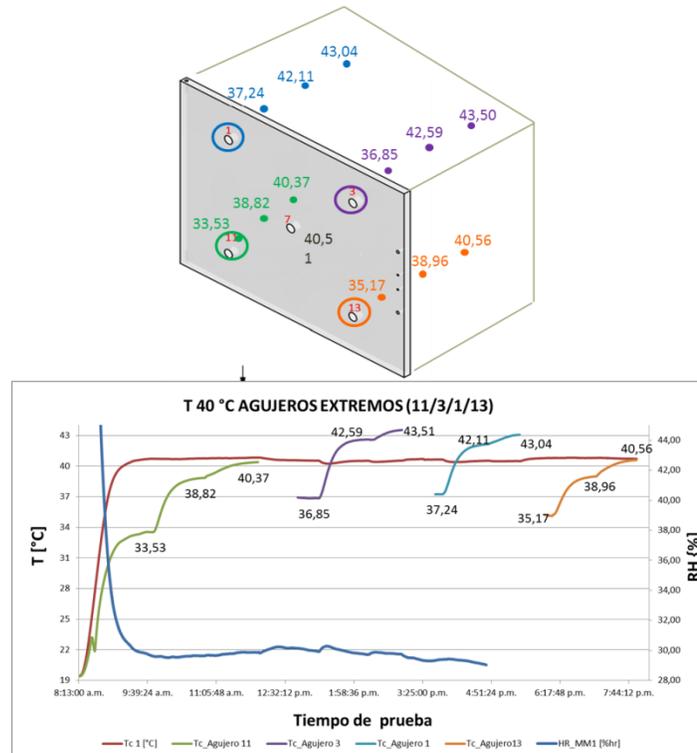
Fuente: Elaboración propia.

La caracterización encontró que al cabo de un poco más de tres (3) horas de estabilidad en la incubadora el valor mínimo de temperatura registrado fue de 40,57 °C y el máximo fue de 40,70 °C; se calculó la desviación estándar de todos los datos durante el tiempo de estabilidad y su valor fue de 0,045 cuyo dato será clave y utilizado en las ecuaciones del Anexo 2 para estimar la incertidumbre de medición por estabilidad en temperatura en el punto de calibración de 40°C.

El método que se usó para realizar la caracterización de uniformidad fue similar a la caracterización de humedad, posicionando un medidor patrón en el agujero del centro y realizando mediciones en todo el volumen de la incubadora con el segundo medidor patrón variando posiciones de agujeros y posiciones de profundidad en cada agujero, se inició la caracterización en los agujeros extremos de la incubadora,

ya que teóricamente son los puntos con más criticidad en la medición por el hecho de posicionar el sensor muy cerca de las paredes, las cuales son sumideros de calor.

Gráfica 30: Caracterización de temperatura agujeros Esquina-extremos de la incubadora.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12: Diferenciales de temperatura a 40°C en agujeros Esquina/extremos.

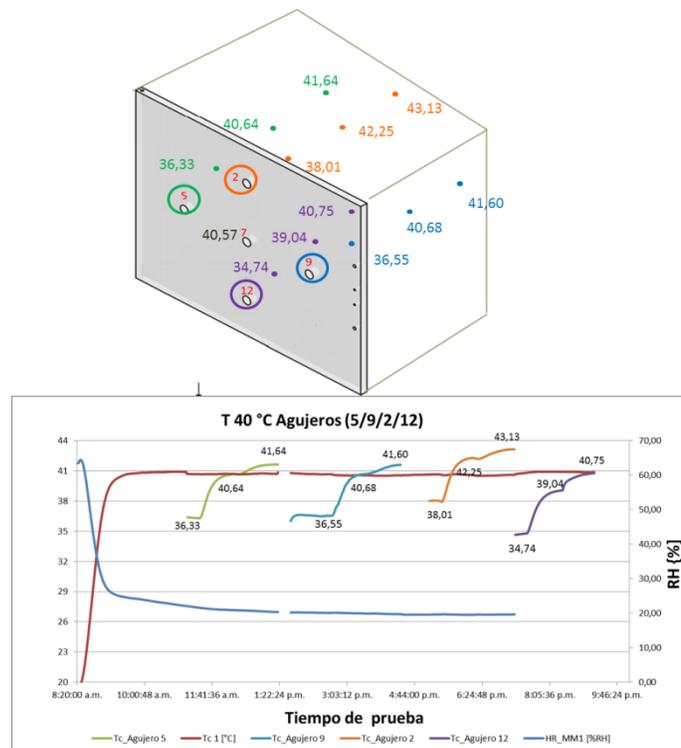
N° Agujero	Posición de profundidad	Lectura de temperatura promedio [°C]	Temperatura de referencia Agujero 7 [°C]	Diferencia absoluta [°C]
1	1.1	37,24	40,64	3,4
	1.2	42,11	40,52	1,59
	1.3	43,04	40,49	2,55
13	13.1	35,17	40,79	5,62
	13.2	38,96	40,80	1,84
	13.3	40,56	40,72	0,16
3	3.1	36,85	40,54	3,69
	3.2	42,59	40,51	2,08
	3.3	43,50	40,52	2,98

11	11.1	33,53	40,70	7,17
	11.2	38,82	40,75	1,93
	11.3	40,37	40,83	0,46

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la caracterización de temperatura en los agujeros a los extremos del área mostraron gradientes de temperatura muy grandes, mayoritariamente en la primera posición de profundidad, por lo que se estipuló en definitivo, no tener en cuenta estos agujeros para un futuro uso de calibración y tampoco en el modelo de incertidumbre; por lo tanto, no se caracterizarán los agujeros extremos en los puntos de temperatura de 25°C y 10°C.

Gráfica 31: Caracterización de temperatura agujeros centro-extremos de la incubadora.



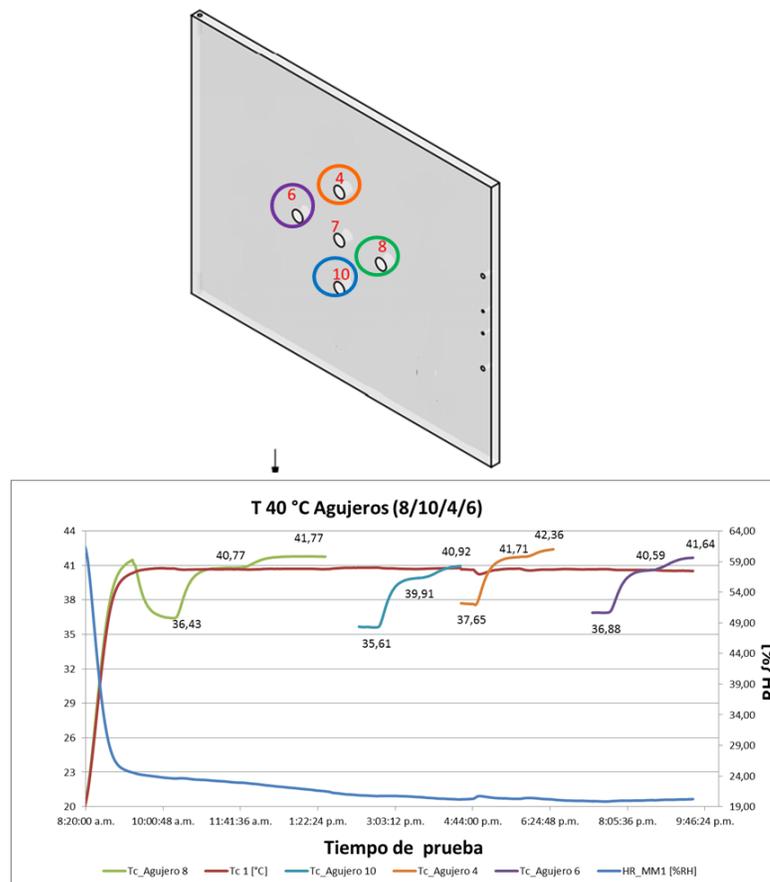
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13: Diferenciales de temperatura a 40°C en agujeros centro-extremos.

N° Agujero	Posición de profundidad	Lectura de temperatura promedio (Patrón 2) [°C]	Temperatura de referencia Agujero 7 (Patrón 1) [°C]	Diferencia absoluta [°C]
5	5.1	36,33	40,68	4,35
	5.2	40,64	40,71	0,07
	5.3	41,64	40,71	0,93
9	9.1	36,55	40,68	4,13
	9.2	40,68	40,57	0,11
	9.3	41,60	40,56	1,04
2	2.1	38,04	40,65	2,61
	2.2	42,25	40,62	1,63
	2.3	43,13	40,60	2,53
12	12.1	34,74	40,76	6,02
	12.2	39,04	40,91	1,87
	12.3	40,75	40,86	0,11

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 32: Caracterización de temperatura agujeros del centro de la incubadora (8/10/4/6).



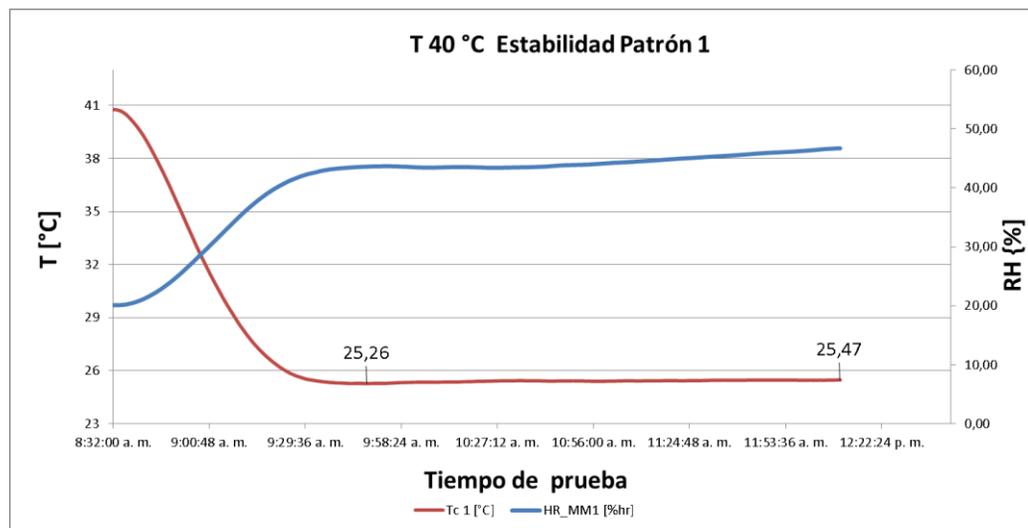
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14: Diferenciales de temperatura a 40°C en agujeros del medio de la incubadora.

N° Agujero	Posición de profundidad	Lectura de temperatura promedio (Patrón 2) [°C]	Temperatura menor de referencia Agujero 7 (Patrón 1) [°C]	Diferencia absoluta [°C]
8	8.1	36,43	40,73	4,3
	8.2	40,77	40,67	0,1
	8.3	41,77	40,68	1,09
10	10.1	35,61	40,81	5,2
	10.2	39,91	40,69	0,78
	10.3	40,92	40,78	0,14
4	4.1	37,65	40,64	2,99
	4.2	41,71	40,72	0,99
	4.3	42,36	40,64	1,72
6	6.1	36,88	40,68	3,8
	6.2	40,59	40,60	0,01
	6.3	41,64	40,53	1,11

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 33: Curva de estabilidad de la temperatura en la incubadora a 25°C.

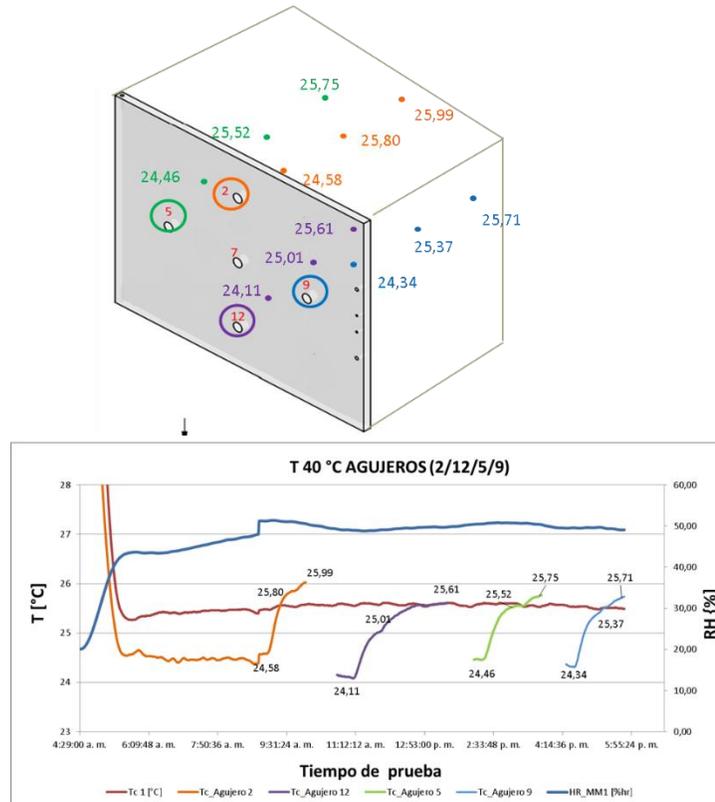


Fuente: Elaboración propia.

La caracterización encontró que al cabo de un poco más de tres (3) horas de estabilidad en la incubadora el valor mínimo de temperatura registrado fue de 25,26 °C y el máximo fue de 25,47 °C; se calculó la desviación estándar de todos los datos durante el tiempo de estabilidad y su valor fue de 0,051 cuyo dato será clave

y utilizado en las ecuaciones del Anexo 2 para estimar la incertidumbre de medición por estabilidad en temperatura en el punto de calibración de 25°C.

Gráfica 34: Caracterización de temperatura agujeros Medio/extremos de la incubadora.



Fuente: Elaboración propia.

N° Agujero	Posición de profundidad	Lectura de temperatura promedio (Patrón 2) [°C]	Temperatura de referencia Agujero 7 (Patrón 1) [°C]	Diferencia absoluta [°C]
2	2.1	24,58	25,48	0,9
	2.2	25,80	25,55	0,25
	2.3	25,99	25,57	0,42
12	12.1	24,11	25,59	1,48
	12.2	25,01	25,58	0,57
	12.3	25,61	25,60	0,01
5	5.1	24,46	25,55	1,09
	5.2	25,52	25,60	0,08
	5.3	25,75	25,54	0,21
9	9.1	24,34	25,54	1,2
	9.2	25,37	25,49	0,12
	9.3	25,71	25,50	0,21

Fuente: Elaboración propia.

Al observar las mediciones tomadas, es fácil observar que los gradientes más grandes de temperatura se encuentran en la primera posición de caracterización (menos profunda).

Debido a que en esta posición gran longitud de la sonda se encuentra por fuera de la cámara, y los resultados obtenidos siempre se encuentran por debajo de la temperatura de referencia, se plantea la hipótesis de que la temperatura ambiente afecta directamente las mediciones tomadas por la sonda, afortunadamente no se usará esta posición a futuro en ninguna calibración, por lo que estos gradientes no serán considerados en el modelo de incertidumbre.

Otra característica que puede observarse en las gráficas e ilustraciones es que, en los agujeros horizontales ubicados en el centro del volumen de la incubadora presentan gradientes pequeños y las curvas de comportamiento en estos puntos tienden a aproximarse mucho a la temperatura de referencia en la segunda posición de profundidad (media), demostrando que es la zona y longitud de inmersión ideal para introducir los instrumentos al momento de realizar las calibraciones.

5.3 CUARTA ACTIVIDAD: EJECUTAR PRUEBAS DE VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE CALIBRACIÓN Y EMITIR UN INFORME CON LOS RESULTADOS, ASEGURAMIENTO METROLÓGICO.

Se realizaron dos ejercicios de comparación bilateral entre resultados obtenidos por el laboratorio del CDT de GAS y los resultados de calibración de dos laboratorios nacionales que actualmente cuentan con acreditación por parte del Organismo Nacional de Acreditación de Colombia – ONAC bajo la norma NTC-ISO/IEC 17025, para la ejecución de servicios de calibración de medidores de condiciones ambientales: MESURA METROLOGÍA LTDA y COLMETRIK, al calibrar dos instrumentos de medición de humedad relativa ambiente. Los ejercicios de

comparabilidad son comúnmente usados por un laboratorio, entre otros ejercicios, para validar sus métodos de calibración.

La norma NTC - ISO/IEC 17043⁸ establece criterios de evaluación del desempeño de un laboratorio en un ejercicio de comparabilidad, mediante el cálculo de estadísticas de desempeño, por medio de las cuales se puede estimar el grado de equivalencia de las mediciones entre laboratorios. El estadístico de desempeño empleado en este caso, es el denominado “Números E_n ”, comúnmente referenciado como “Error Normalizado”. La ecuación se muestra a continuación.

$$E_n = \frac{x - X}{\sqrt{u_{lab}^2 + U_{ref}^2}}$$

Dónde:

x = es el resultado del participante.

X = es el valor asignado o valor de referencia

U_{lab} = es la incertidumbre expandida del resultado del participante.

U_{ref} = es la incertidumbre expandida del valor asignado del laboratorio de referencia.

El criterio para la evaluación de desempeño que se aplica es el siguiente:

$|E_n| \leq 1,0$ Indica desempeño “satisfactorio”.

$|E_n| > 1,0$ Indica desempeño “insatisfactorio”

Para la calibración de los medidores de humedad, cada laboratorio emplea sus propios procedimientos, considerando el alcance de los medidores. Dentro del

⁸ [6] ISO/CASCO Committee on conformity assessment. ISO/IEC 17043:2010 Conformity assessment -- General requirements for proficiency testing. International Organization for Standardization; 2010.

análisis estadístico, se tomaron los resultados emitidos por los patrones del banco para cada valor de humedad relativa, así como los valores de referencia contra los cuales se realiza la comparación.

El mensurando objeto de la comparación correspondió al Error relativo de medición, obtenido por cada laboratorio al calibrar los medidores sobre un conjunto de puntos de humedad relativa. Cada laboratorio estimó y declaró la incertidumbre de medición para los resultados de la calibración del medidor, siguiendo las directrices de la Guía para la Expresión de la incertidumbre de Medida (GUM).

Para cada caso, se confirmó la comparabilidad entre las mediciones de los laboratorios en los intervalos analizados, con valores de En menores a uno (1) para cada uno de los puntos de humedad relativa, validando la incertidumbre expandida asociada a cada resultado. Esto proporciona evidencia de que la incertidumbre estimada es consistente con la definición de incertidumbre expandida dada por la GUM, y que el banco de calibración desarrollado por el CDT de GAS tiene un desempeño aceptable.

5.3.1 Medidores bajo prueba

Para la ejecución de las pruebas de comparabilidad fueron empleados los siguientes medidores, que permitieron cubrir el alcance total y las tecnologías de medición aceptadas para el método.

Tabla 15: Medidor de condiciones ambientales (Medidor bajo prueba).

Tipo:	Medidor de condiciones ambientales	
Fabricante:	KESTREL	
Modelo:	5000	
Identificación:	S/N: 2157087 – ID: HL-020	
Alcance:	10% HR a 90% HR	
Certificado de Calibración	MM-H-2788 (emitido por Mesura)	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16: Medidor de temperatura y humedad relativa termohigrómetro.

Tipo:	Termohigrómetro	
Fabricante:	HONEYWELL	
Modelo:	H7011B1008-4	
Identificación:	S/N: CDT178 – ID: HL-003	
Alcance:	5% HR A 95% HR	
Certificado de Calibración:	CMK-HRS-17009 (emitido por Colmetrik)	

Fuente: Elaboración propia.

5.3.2 Patrones de humedad del CDT de GAS

Tabla 17: Patrones de calibración en temperatura y humedad relativa.

Patrón:	MM1	MM2
Tipo:	Termohigrómetro con indicador digital	
Fabricante:	VAISALA	
Modelo:	HMP76	
Identificación:	S/N: N3430454 – ID: HL - 024	S/N: N3430455 – ID: HL - 025
Alcance Operativo:	0% HR A 100% HR	0% HR A 100% HR
Certificado de Calibración:	BOS183140056 (emitido por Vaisala)	BOS183140058 (emitido por Vaisala)
Imagen:		

Fuente: Elaboración propia.

5.3.3 Resultados de comparabilidad en humedad relativa para el medidor bajo prueba HL – 020.

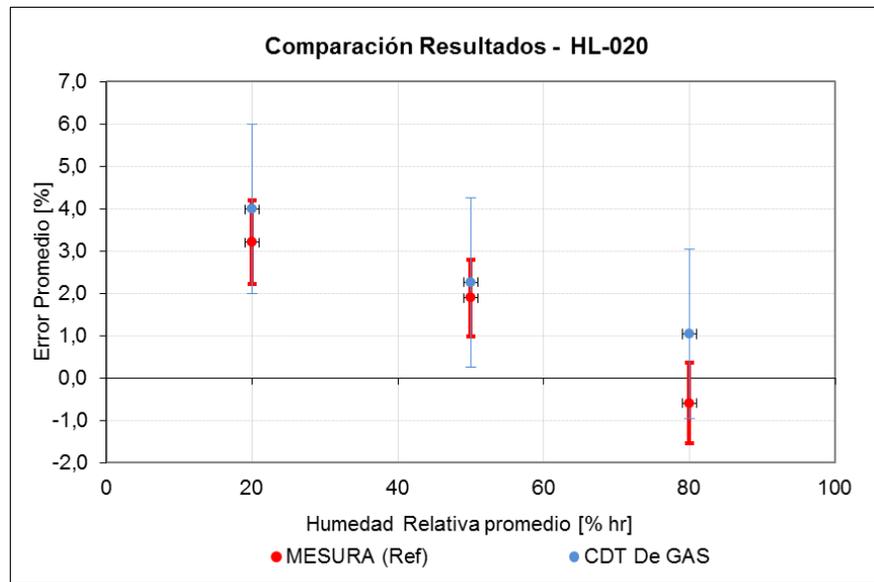
Las curvas de calibración obtenidas para el medidor de condiciones ambientales se observan en la Gráfica 35, siendo los puntos en rojo los reportados por el laboratorio MESURA, tomados como valores de referencia. Los puntos evaluados fueron 20% HR, 50% HR, 80% HR. La siguiente tabla muestra los resultados de E_n , todos menores a uno (1), mediante lo cual se puede afirmar que la comparación fue exitosa y que sus mediciones son comparables, según los criterios de evaluación de resultados mencionados anteriormente.

Tabla 18: Resultados de comparación para el medidor HL-020.

HR [% hr]	Fuente		Error Xi	U Expandida Uxi (k=2,0)	di	U(di)	En	Desempeño
20,0			%	%	%	%	0,35	Satisfactorio
	MESURA - Ref		3,20	0,99				
	CDT		3,99	2,00	-0,79	2,23		
50,0	Fuente		Error Xi	U Expandida Uxi (k=2,0)	di	U(di)	En	Desempeño
			%	%	%	%	0,17	Satisfactorio
	MESURA - Ref		1,89	0,90				
CDT		2,26	2,00	-0,37	2,19			
80,0	Fuente		Error Xi	U Expandida Uxi (k=2,0)	di	U(di)	En	Desempeño
			%	%	%	%	0,74	Satisfactorio
	MESURA - Ref		-0,60	0,95				
CDT		1,04	2,00	-1,64	2,21			

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 35: Gráfica de resultados obtenidos para el medidor HL-020.



Fuente: Elaboración propia.

5.3.4 Resultados de veracidad en humedad relativa para el medidor bajo prueba HL – 003.

Las curvas de calibración obtenidas para el medidor de condiciones ambientales se observan en la

Gráfica 36, siendo los puntos en rojo los reportados por el laboratorio COLMETRIK, tomados como valores de referencia. Los puntos evaluados fueron 20% HR, 50% HR, 80% HR. La siguiente tabla muestra los resultados de E_n , todos menores a uno (1), mediante lo cual se puede afirmar que la comparación fue exitosa y que sus mediciones son comparables, según los criterios de evaluación de resultados mencionados anteriormente.

Tabla 19: Resultados de comparación para el medidor HL-003.

HR [% hr]	Fuente	Error Xi	U Expandida Uxi (k=2,0)	di	U(di)	En	Desempeño
20,0		%	%	%	%		
	COLMETRIK 2017 (Ref)	7,97	1,70				

	CDT DE GAS	7,40	2,00	0,57	2,62	0,22	Satisfactorio
--	------------	------	------	------	------	-------------	----------------------

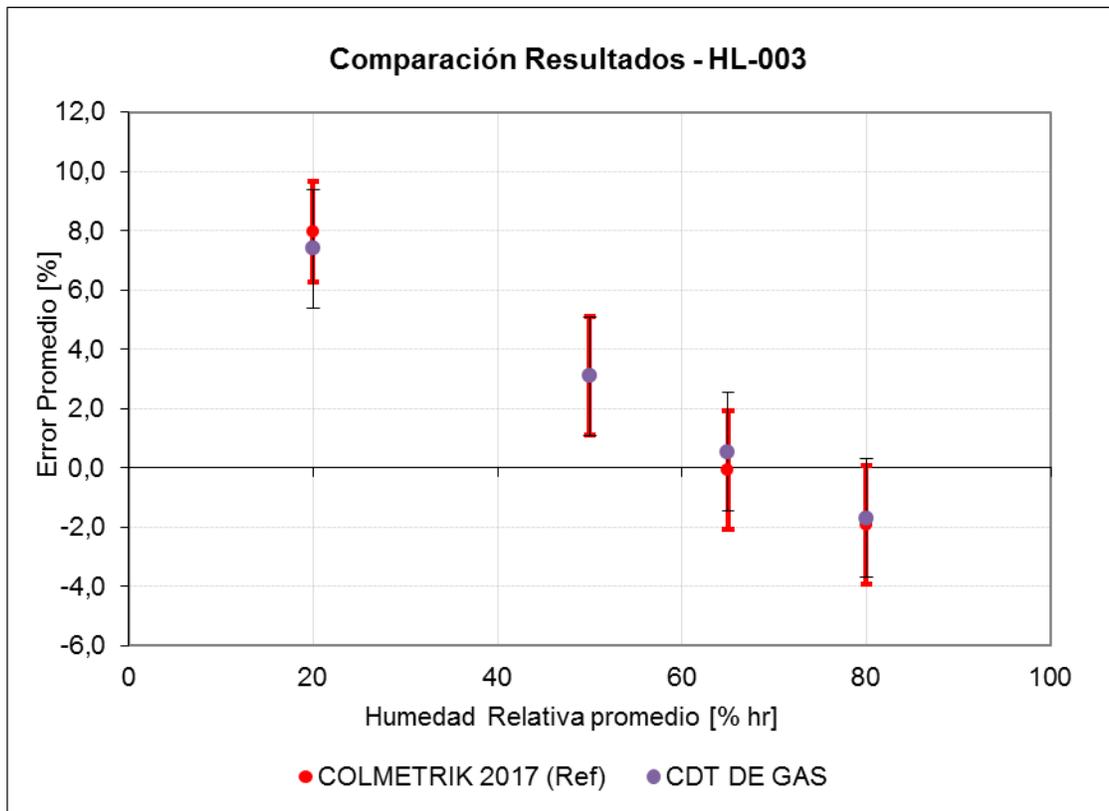
50,0	Fuente	Error Xi	U Expandida Uxi (k=2,0)	di	U(di)	En	Desempeño
		%	%	%	%		
	COLMETRIK 2017 (Ref)	3,11	2,00	%	%		
	CDT DE GAS	3,10	2,00	0,01	2,83	0,00	Satisfactorio

65,0	Fuente	Error Xi	U Expandida Uxi (k=2,0)	di	U(di)	En	Desempeño
		%	%	%	%		
	COLMETRIK 2017 (Ref)	-0,06	2,00	%	%		
	CDT DE GAS	0,53	2,00	-0,59	2,83	0,21	Satisfactorio

80,0	Fuente	Error Xi	U Expandida Uxi (k=2,0)	di	U(di)	En	Desempeño
		%	%	%	%		
	COLMETRIK 2017 (Ref)	-1,92	2,00	%	%		
	CDT DE GAS	-1,69	2,00	-0,23	2,83	0,08	Satisfactorio

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 36: Gráfica de resultados obtenidos para el medidor HL-003.



Fuente: Elaboración propia.

Se convocó una reunión entre el director de la corporación, los líderes del área de investigación, laboratorio e ingeniería para discutir los problemas del banco de calibración para termo-higrómetros con el fin de verificar si se debe ampliar el rubro de inversión al proyecto y acatar estrictamente el procedimiento normalizado, buscar otras soluciones alcanzables en materia física y económica, o definir un alcance parcial dentro de los límites y requerimientos de la norma para ofrecer el servicio, se presenta el informe con los respectivos resultados y análisis en el Anexo 1.

5.4 QUINTA ACTIVIDAD: DESARROLLAR PROCEDIMIENTOS DE CALIBRACIÓN DE TERMOHIGRÓMETROS Y DE OPERACIÓN DEL BANCO DE CALIBRACIÓN, UNA PLANTILLA BÁSICA DE CÁLCULO DE ERROR E INCERTIDUMBRE DE LAS MEDICIONES PARA LA OPERACIÓN DEL BANCO DE CALIBRACIÓN Y UN INSTRUCTIVO PARA SU MANEJO.

Esta actividad se encuentra en proceso; los instructivos, procedimientos y plantillas se encuentran en modificación, sin embargo no pueden ser terminados hasta que se cumplan con todas las caracterizaciones del banco y la cámara de temperatura, se concluya la construcción del modelo final del banco de generación de humedad y todo lo referente al proyecto esté en perfecta marcha, sin embargo, ya se encuentran los apartados en el listado maestro del área de calidad para poder anexar dichos documentos a la carpeta del servidor interno de la corporación.

El anexo del procedimiento técnico de calibración “Modelo matemático y la estimación de la incertidumbre para termo-higrómetros”, además de la plantilla de cálculo se logró solventar y quedó en revisión, se muestra el avance en el Anexo 2 al final del informe.

6. CONCLUSIONES

- Durante todo el desempeño de la práctica, se aprendió constantemente sobre temas de metrología, comportamiento en temperatura y humedad del aire ambiente, incertidumbre y otros temas que implicaron la apropiación en el desarrollo del proyecto interno de la Corporación CDT de GAS “Banco de generación de humedad relativa y temperatura ambiente para un servicio de calibración de termo-higrómetros”;
- No se logró completar el ensamble final del banco de generación de humedad debido a la falta de disposición de un elemento mecánico establecido en el diseño conceptual, el cual es una válvula de bola en la salida de aire del

generador; sin embargo, se logró construir lo suficiente para poder realizar pruebas de funcionamiento y caracterización, además se implementaron adaptaciones en la etapa de saturación del aire, lo que permitió mejorar y asegurar el alcance de generación del banco asegurando su funcionamiento ante los percances presentados durante las pruebas de desempeño.

- Se realizaron varias caracterizaciones y pruebas de desempeño para la cámara de temperatura y mayoritariamente para el generador de humedad relativa; sin embargo, la necesidad de lograr el alcance de operación bajo las condiciones y percances del laboratorio donde se va a establecer el servicio, crearon la necesidad de ingeniar soluciones y recurrir a cambios que descartaron caracterizaciones realizadas, reiniciando el desarrollo de dichas actividades y retrasando el cumplimiento de la totalidad de los objetivos y actividades estipuladas para el proyecto.
- No se lograron realizar las respectivas pruebas de confirmación de método como el informe de repetibilidad y reproducibilidad y el informe de veracidad; sin embargo, durante el desarrollo de la práctica se logró realizar comparaciones de medidas con algunos instrumentos que se calibraron en otros laboratorios donde ya ofrecen un servicio acreditado encontrando resultados comparables.
- Fue posible realizar avances en los procedimientos técnicos de operación del banco generador de humedad y la incubadora, el procedimiento técnico de calibración y su anexo para la estimación de incertidumbre, además de la respectiva plantilla de cálculo, sin embargo, estos avances quedaron inconclusos ante la corporación debido a que no se lograron todas las caracterizaciones necesarias para concluir el proyecto e hicieron falta algunos detalles para completar el ensamble final del generador de humedad y contemplarlo en su procedimiento de operación.
- Aunque se estableció el modelo matemático y se identificaron las fuentes para la estimación de incertidumbre, no se puede definir con seguridad en el presente informe valores de incertidumbre para los puntos de calibración

establecidos para el servicio, ya que hicieron falta datos clave para desarrollar los cálculos.

7. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Para la realización de las caracterizaciones faltantes se recomienda establecer una mejor comunicación y supervisión de las mediciones con los profesionales de la corporación para evitar realizar pruebas a elementos innecesarios o dar continuación a pruebas descartables a partir de la primera realizada, esto ahorrará tiempo que puede ser invertido en siguientes caracterizaciones o procesos necesarios para el desarrollo y futura acreditación del servicio, además definir clara y concretamente la metodología de caracterizaciones, ya que algunos métodos también pueden necesitar menos tiempo para su realización, sin embargo, lo ideal es discutirlo con los profesionales de calibración e identificar cómo puede afectar a la confiabilidad de los resultados el método elegido.

Es esencial definir previamente como se establecerá un servicio de calibración en cuanto al cumplimiento del procedimiento normalizado, lo más recomendable si se desea ofrecer un servicio bajo un procedimiento normalizado como se estableció en el presente proyecto es acatar lo que se encuentra explícito en el texto y no realizar conjeturas que dificulten o hagan imposible el desarrollo de partes importantes del proyecto.

Los servicios de calibración suelen depender demasiado de las condiciones ambientales a las que se exponen para la confiabilidad, repetibilidad y reproducibilidad de los resultados, y esto es más crítico cuando se trata de la humedad relativa; por lo que, es muy importante definir escenarios constantes, realizar las pruebas procurando mantener siempre las mismas condiciones y verificar con anterioridad los factores que puedan afectar el desempeño de los productos. En base a lo anterior, se recomienda ubicar el generador de humedad en un lugar del laboratorio donde no se encuentre directamente expuesto a las corrientes de ventilación de la unidad acondicionadora de aire o realizar las pruebas

siempre con el dispositivo en horas previamente encendido y bajo la misma configuración de temperatura.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES. Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM). Comité Conjunto para las Guías en Metrología (JCGM). 2008.

CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA. PROCEDIMIENTO TH-007 PARA LA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE CONDICIONES AMBIENTALES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD EN AIRE: Proceso de Calibración. Madrid: CEM, Edición digital. NIPO: 706-08-007-9.

RUIZ, Antonio. GARCIA, José. MESA, José. ERROR, INCERTIDUMBRE, PRECISIÓN Y EXACTITUD, TÉRMINOS ASOCIADOS A LA CALIDAD ESPACIAL DEL DATO GEOGRÁFICO. En: Congreso Internacional de Catastro Unificado y Multipropósito. [En línea]. (2010). [Consultado 17 Mar. 2018]. Disponible en http://coello.ujaen.es/congresos/cicum/ponencias/Cicum2010.2.02_Ruiz_y_otros_Error_incertidumbre_precision.pdf.

INSTRUMENTOS CIENTIFICOS SA. Norma ISO 17025. En: Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. [En línea]. [Consultado 17 Mar. 2018]. Disponible en <https://www.icsa.es/laboratorios-analiticos/consultoria-de-laboratorios/norma-iso-17025>.

DETERMINING UNCERTAINTIES OF RELATIVE HUMIDITY, DEW/FROST-POINT TEMPERATURE, AND MIXING RATIO IN A HUMIDITY STANDARD GENERATOR. En: National Institute of Standards and technology. Vol1. [Consultado 27 mar. 2018]. Disponible en https://ws680.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=901715.

ISO/CASCO Committee on conformity assessment. ISO/IEC 17043:2010 Conformity assessment -- General requirements for proficiency testing. International Organization for Standardization; 2010.

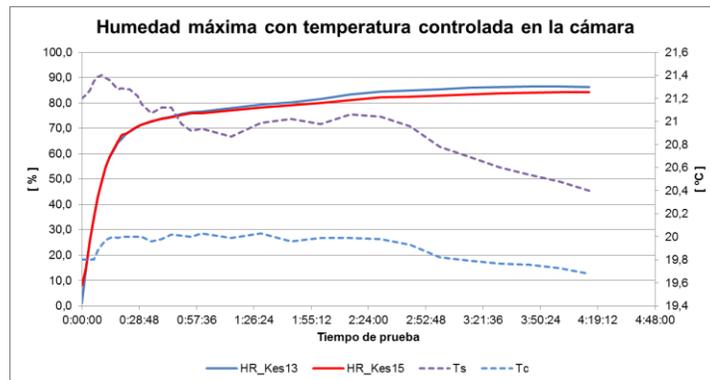
9. ANEXOS

9.1 ANEXO 1

INFORME DE ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO DEL BANCO GENERADOR DE HUMEDAD PARA REVISIÓN POR ALTA DIRECCIÓN Y EQUIPO DE INVESTIGACIÓN.

Luego de realizar varias pruebas para caracterizar el comportamiento del generador de humedad, se logró cumplir satisfactoriamente con los alcances estimados para la calibración de humedad relativa en diferentes cámaras de prueba manteniendo la temperatura fija; concluyendo inicialmente que para conformidad en el cumplimiento de la norma TH-007 se estipuló utilizar la misma cámara para la calibración de ambos mensurados, encontrando los siguientes resultados.

Gráfica 31: humedad máxima alcanzada



Fuente: Elaboración propia

HRmax= 86,5%

TProm= 19,4 °C

$\Delta T = 0,3$ °C

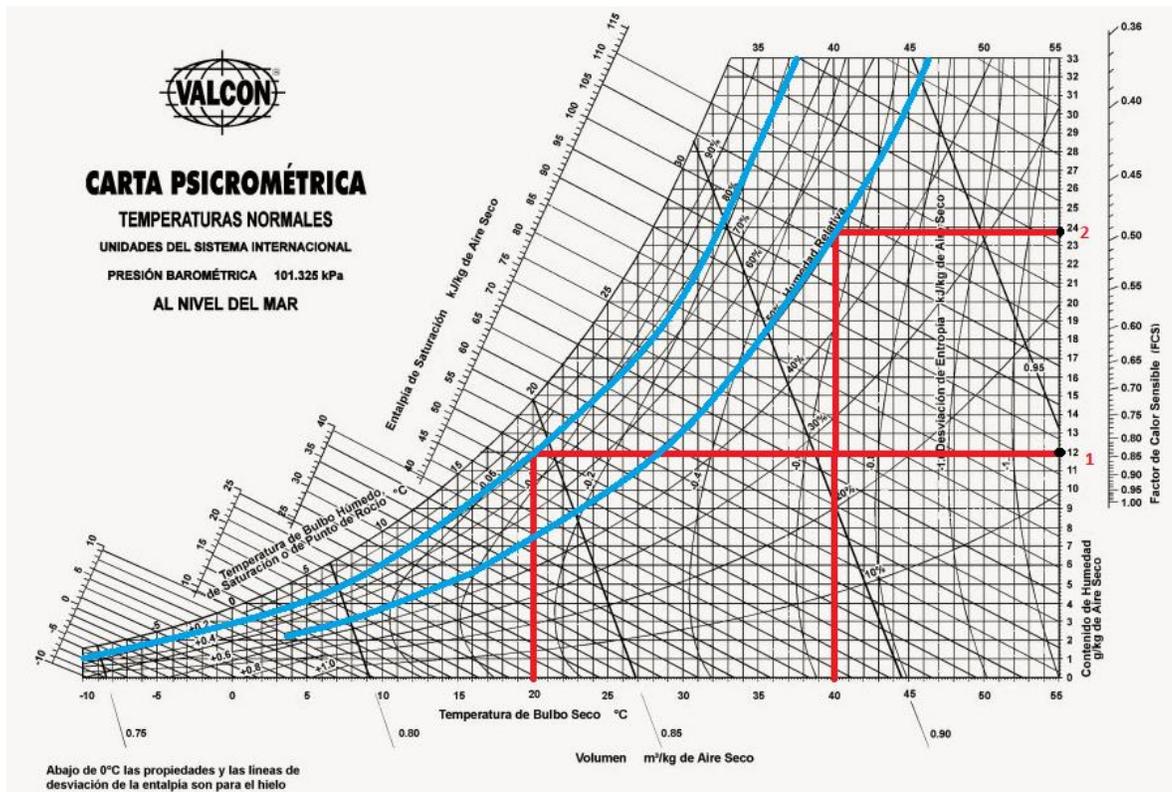
Pprom= 903,1 hPa

Los resultados para la calibración de temperatura, por otro lado, no fueron satisfactorios, se evidenció que para mantener la humedad fija dentro de la cámara mientras se varía la temperatura, se debe estar ajustando constantemente los rotámetros acorde a como haga secado o saturación debido a esos cambios de temperatura, además, se evidenció que en

el punto de calibración con temperatura a 40 °C la humedad relativa máxima alcanzada no superó los 30%.

El análisis que explica este fenómeno se basa en la interpretación y los cálculos estimados con la carta psicrométrica, la cual explica el comportamiento del aire ambiente.

Imagen 12: Análisis carta psicrométrica.



Fuente: Elaboración propia

El punto [1] muestra la intercepción entre la línea de temperatura de bulbo seco y la línea de humedad relativa a 80%, mostrando en la derecha que para lograr ese punto de humedad relativa, el banco debe saturar mínimo 12g de agua por cada kilogramo de aire presente.

La ecuación para calcular ese parámetro se encontró en un artículo del NIST del autor Peter H. Huang⁹.

$$R_v = \frac{f(P_s, T_s)e_w(T_s)}{P_s - f(P_s, T_s)e_w(T_s)}$$

Dónde:

R_v = Relación de mezcla por volumen

$f(P_s, T_s)$ = Es el factor de mejora, es decir, la corrección del comportamiento no ideal de la mezcla de vapor de agua y aire a la presión de saturación P_s y temperatura T_s .

P_s = Presión en el saturador

$e_w(T_s)$ = Presión parcial de vapor del saturador

Esta ecuación puede ser expresada en términos de relación de masa simplemente multiplicándola por la relación de masa molar de agua a la del aire seco, (0,622).

Los cálculos se realizan con las mismas variables pero tomadas en la cámara de calibración.

Las ecuaciones para calcular las variables anteriores, se encuentran a continuación:

$$f(t, P) = \exp[\alpha(t) * \left(1 - \frac{e_w(t)}{P}\right) + \beta(t) * \left(\frac{P}{e_w(t)} - 1\right)]$$

Dónde:

$$\alpha(t) = \sum_{i=1}^4 A_i * T^i$$

⁹ H. Huang, Peter. DETERMINING UNCERTAINTIES OF RELATIVE HUMIDITY, DEW/FROST-POINT TEMPERATURE, AND MIXING RATIO IN A HUMIDITY STANDARD GENERATOR. En: National Institute of Standards and technology. Vol1. [Consultado 27 mar. 2018]. Disponible en < https://ws680.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=901715>.

$$\beta(t) = \exp\left[\sum_{i=1}^4 B_i * T^i\right]$$

$$ew_{Tc} = EXP([a0 \cdot Tc_{abs}^{-2}] + [a1 \cdot Tc_{abs}^{-1}] + [a2 \cdot Tc_{abs}^0] + [a3 \cdot Tc_{abs}^1] + [a4 \cdot Tc_{abs}^2] + [a5 \cdot Tc_{abs}^3] + [a6 \cdot Tc_{abs}^4] + [a7 \cdot Tc_{abs}])$$

$$Tc_{abs} = Ts + 273,15 \text{ } ^\circ K$$

Dónde:

a0=-2836,5744

a1=-6028,076559

a2=19,54263612

a3=-0,02737830188

a4=0,000016261698

a5=0,00000000070229056

a6=-0,00000000000018680009

a7=2,7150305

Con los datos registrados por instrumento de medición para condiciones ambientales KESTREL (EQ-267) y corregido bajo sus certificados de calibración, se realizó el cálculo para el contenido de humedad máximo alcanzado por el banco de generación a 20 °C.

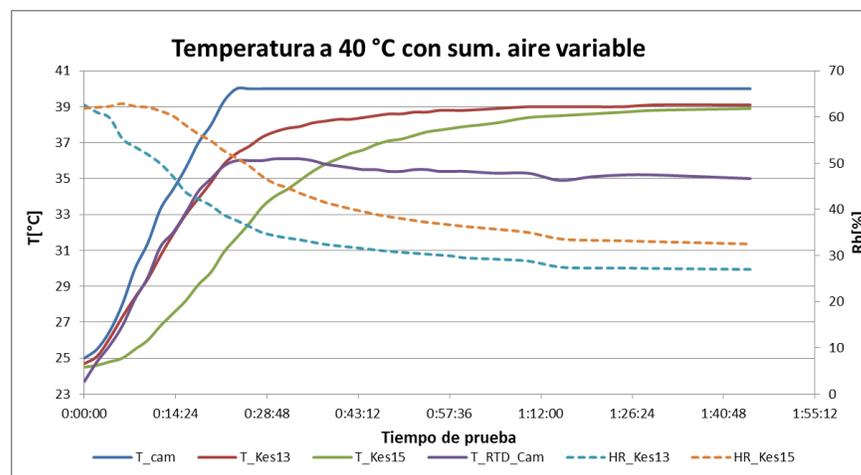
Tabla 6: Cálculo de cantidad de humedad absorbida [g H2O/ Kg Aire seco].

Ingresar Datos			
Tc	19,50	°C	Temperatura de la cámara de prueba
Tc_abs	292,65	°C	Temperatura de la cámara de prueba convertida
e_w (Tc)	2267,78	Pa	Presión de vapor de agua en la cámara de prueba
Pc	90190	Pa	Presión absoluta de la cámara de prueba
α (Tc)	0,00109	---	Coefficiente alpha del factor de incremento de la cámara de prueba
β (Tc)	0,00007	---	Coefficiente beta del factor de incremento de la cámara de prueba
f (Pc,Tc)	1,00365	---	Factor de incremento del vapor de agua de la cámara de prueba
Rv	16,10331	g H2o /kg Aire	Relación de masas de agua por kg de aire seco para HR=100%
Rv	12,88	g H2o /kg Aire	Relación de masas de agua por kg de aire seco para HR=80%

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, el problema se encuentra en la calibración de temperatura, donde se estableció mantener una humedad fija en el proceso: el punto [2] en la imagen de la carta psicrométrica muestra visualmente el contenido de humedad necesario para mantener el porcentaje de humedad fijo, el cual se estableció en (HR=50%), los resultados de la caracterización mostraron lo siguiente y con esos datos se calculó, de la misma manera, el contenido de humedad logrado a temperatura de 40°C.

Gráfica 32: Gráfica de datos para el cálculo de la cantidad máxima de humedad en la cámara



Fuente: Elaboración propia.

$HR_{max}(T: 40^{\circ}C) = 27\%$

$T_{max} = 39,2^{\circ}C$

$\Delta HR = 32,9\%$

$P_{prom} = 904 \text{ hPa}$

Tabla 7: Cálculo de la cantidad de humedad máxima alcanzada en la cámara y la cantidad máxima requerida para mantener la humedad en 50%.

Ingresar Datos			
Tc	39,20	°C	Temperatura de la cámara de prueba
Tc_abs	312,35	°C	Temperatura de la cámara de prueba convertida
e_w (Tc)	7076,03	Pa	Presión de vapor de agua en la cámara de prueba
Pc	90460	Pa	Presión absoluta de la cámara de prueba
α (Tc)	0,00242	---	Coficiente alpha del factor de incremento de la cámara de prueba
β (Tc)	0,00018	---	Coficiente beta del factor de incremento de la cámara de prueba
f (Pc,Tc)	1,00435	---	Factor de incremento del vapor de agua de la cámara de prueba
Rv	53,03236	g H2o /kg Aire	Relación de masas de agua por kg de aire seco para HR=100%
Rv	14,32	g H2o /kg Aire	Relación de masas de agua por kg de aire seco para HR=27%
Rv	26,52	g H2o /kg Aire	Relación de masas de agua por kg de aire seco que necesitaría para HR=50%

Fuente: Elaboración propia.

Los cálculos mostraron que a temperatura de 40°C se logra obtener en la cámara de calibración un contenido de humedad de 14,32 g de agua/ kg de aire seco, sin embargo, la meta requiere lograr mínimo 26,52 g de agua/kg de aire seco para mantener la humedad relativa en 50% a dicha temperatura.

El banco actual no tiene la capacidad para proporcionar un buen funcionamiento en calibración de temperatura, ya que, al momento de variar los puntos de calibración en temperatura, es necesario ajustar continuamente los rotámetros para mantener constante la humedad relativa dentro de la cámara y existen puntos donde es demasiado complicado o imposible lograrlo.

1. Se encontraron varios factores importantes a tener en cuenta; como se puede observar en la imagen de la carta psicrométrica y en los cálculos realizados, a medida que la temperatura varía, el contenido de humedad requerido también, lo que plantea la hipótesis de que para mantener estable la humedad relativa, se debe establecer un control variable donde la temperatura del agua y en toda la línea de suministro de aire húmedo varíe en igualdad a la temperatura de la cámara, esto asegura teóricamente que la humedad absoluta en el saturador y en la cámara se encuentren iguales y por lo tanto sea posible alcanzar la humedad relativa deseada sin que esta varíe mucho; este acondicionamiento requiere aislar (de la temperatura ambiente) toda la línea para evitar condensación, y posiblemente también sea necesario establecer un control en el ajuste variable del flujo de aire suministrado hacia la cámara.

2. Con el fin de mejorar la etapa de saturación se plantea agregar otro saturador ya sea en serie o en paralelo al banco generador de humedad; sin embargo, previamente se había probado en serie y la presión de suministro caía demasiado, resultando imposible la llegada del aire a la cámara de calibración, por lo que se estableció intentar con otro saturador en paralelo.

9.2 ANEXO 2

A1.2 MODELO MATEMÁTICO PARA INCERTIDUMBRE DE LA CORRECCIÓN DE MEDICIÓN.

El método utilizado para la calibración es por comparación directa, consiste en posicionar los sensores en el centro de la zona de calibración a través de pasa muros habilitados en las cámaras de medición o generadoras para tal fin, los patrones se ubican a la distancia más cercana posible, de manera que el instrumento a calibrar (HR_{MUT}) pueda estar en medio de los dos patrones (HR_{MM1}) y (HR_{MM2}), por lo que el modelo matemático consiste en la resta de la lectura de referencia HR_{MM} y la lectura del medido bajo prueba, como se muestra en la Ecuación 12.

$$C_{HR} = HR_{MM} - HR_{MUT}$$

Ecuación 12. Modelo matemático de la corrección de medición de humedad relativa.

Dónde:

C_{HR} = Corrección de medición de humedad relativa del instrumento bajo prueba [% HR].

HR_{MM} = Promedio de lectura de humedad relativa corregida de los patrones [% HR].

HR_{MUT} = Lectura de humedad relativa del medidor bajo prueba [% HR].

Debido al orden de lectura en el proceso de calibración estipulado en el procedimiento técnico de calibración del presente anexo, la medida de referencia será el promedio entre las lecturas del patrón HR_{MM1} y posteriormente un promedio entre este resultado y la lectura del patrón HR_{MM2} como se especifica en el capítulo 5.3, Nota (3), primera viñeta del procedimiento base 7; estas lecturas y la del instrumento bajo prueba tienen una serie de correcciones que influyen como fuentes de incertidumbre mostradas en las siguientes ecuaciones.

$$HR_{MM} = \frac{1}{2} * [HR_{MM1} + \delta HR_{C1} + \delta HR_{d1} + \delta HR_{1,res} + \delta HR_{1,mi} + \delta HR_{1,int} + \delta HR_{MM2} + \delta HR_{C2} + \delta HR_{d2} + \delta HR_{2,res} + \delta HR_{2,mi} + \delta HR_{2,int}] + \delta HR_{UF} + \delta HR_{EH}$$

Ecuación 13: Correcciones de humedad de los medidores patrón (MM).

Siendo:

HR_{MM1} y HR_{MM2} : Lecturas de humedad relativa tomadas de los patrones.

$\delta hc1$, $\delta hc2$: correcciones en la humedad relativa indicada por el primer y segundo patrón debido a la incertidumbre de calibración.

$\delta h d 1$, $\delta h d 2$: correcciones en la humedad relativa indicada por el primer y segundo patrón debido a la deriva entre calibraciones.

$\delta h 1, res$; $\delta h 2, res$: correcciones en la humedad relativa indicada por el primer y segundo patrón debido a la resolución de los instrumentos.

$\delta h 1, mi$, $\delta h 2, mi$: correcciones en la humedad relativa indicada por el primer y segundo patrón debido a magnitudes de influencia.

$\delta h 1, int$, $\delta h 2, int$: correcciones en la humedad relativa indicada por el primer y segundo patrón debidas al error de interpolación en los resultados del certificado.

$\delta h u h$: corrección en la humedad relativa indicada por los patrones debido a la falta de uniformidad del medio generador.

$\delta h e h$: corrección en la humedad relativa indicada por los patrones debido a la falta de estabilidad del medio generador.

$$HR_{MUT} = HR_x + \delta HR_{x,res} + \delta HR_r + \delta HR_{x,mi}$$

Ecuación 14: Correcciones de humedad del medidor bajo prueba (MUT)

Siendo:

$\delta h x, res$: corrección en la humedad relativa indicada por el instrumento a calibrar debido a la resolución.

$\delta h x, mi$: corrección en la humedad relativa indicada por el instrumento a calibrar debido a magnitudes de influencia.

$\delta h r$: corrección en la humedad relativa indicada por el instrumento a calibrar debido a la falta de repetibilidad.

Cuando el medidor de humedad relativa y temperatura ambiente sea un transmisor, es decir, necesita de un indicador para tomar la lectura en tensión o corriente, esta lectura se escala al equivalente en humedad relativa o temperatura según sea el mensurando con las ecuaciones Ecuación 15 y Ecuación 16 y en el debido caso, se tomarán en cuenta las fuentes de incertidumbre asociadas con el indicador pre-establecido.

$$HR_{MUT} = \frac{HR_{max} - HR_{min}}{I_{max} - I_{min}} * (I_{MUT} - I_{min})$$

Ecuación 15: Ecuación de interpolación de humedad relativa para lazo de corriente.

Dónde:

HR_{max} : Límite máximo del intervalo de medición de humedad relativa.

HR_{min} : Límite mínimo del intervalo de medición de humedad relativa.

I_{max} : Límite máximo de salida eléctrica en corriente.

I_{min} : Límite mínimo de salida eléctrica en corriente.

I_{MUT} : Lectura de corriente del indicador para el instrumento bajo prueba.

$$HR_{MUT} = \frac{HR_{max} - HR_{min}}{V_{max} - V_{min}} * (V_{MUT} - V_{min})$$

Ecuación 16: Ecuación de interpolación de humedad relativa para lazo de tensión.

Dónde:

HR_{max} : Límite máximo del intervalo de medición de humedad relativa.

HR_{min} : Límite mínimo del intervalo de medición de humedad relativa.

V_{max} : Límite máximo de salida eléctrica en tensión.

V_{min} : Límite mínimo de salida eléctrica en tensión.

V_{MUT} : Lectura de tensión del indicador para el instrumento bajo prueba

Para el cálculo de incertidumbre en temperatura el modelo matemático es el mismo intercambiando las variables por las correspondientes a temperatura.

$$C_T = T_{MM} - T_{MUT}$$

Ecuación 17: Modelo matemático de la corrección de medición de temperatura.

$$T_{MM} = \frac{1}{2} * [T_{MM1} + \delta T_{C1} + \delta T_{d1} + \delta T_{1,res} + \delta T_{1,mi} + \delta T_{1,int} + \delta T_{MM2} + \delta T_{C2} + \delta T_{d2} + \delta T_{2,res} + \delta T_{2,mi} + \delta T_{2,int}] + \delta T_{UF} + \delta T_{EH}$$

Ecuación 18: Correcciones de temperatura de los medidores patrón (MM).

$$T_{MUT} = T_x + \delta T_{x,res} + \delta T_r + \delta T_{x,mi}$$

Ecuación 19: Correcciones de la temperatura del medidor bajo prueba (MUT)

$$T_{MUT} = \frac{T_{max} - T_{min}}{I_{max} - I_{min}} * (I_{MUT} - 4 [mA])$$

Ecuación 20: Ecuación de interpolación de temperatura para lazo de corriente.

$$HR_{MUT} = \frac{HR_{max} - HR_{min}}{V_{max} - V_{min}} * (V_{MUT} - V_{min})$$

Ecuación 21: Ecuación de interpolación de temperatura para lazo de tensión.

A1.3 FUENTES DE INCERTIDUMBRE

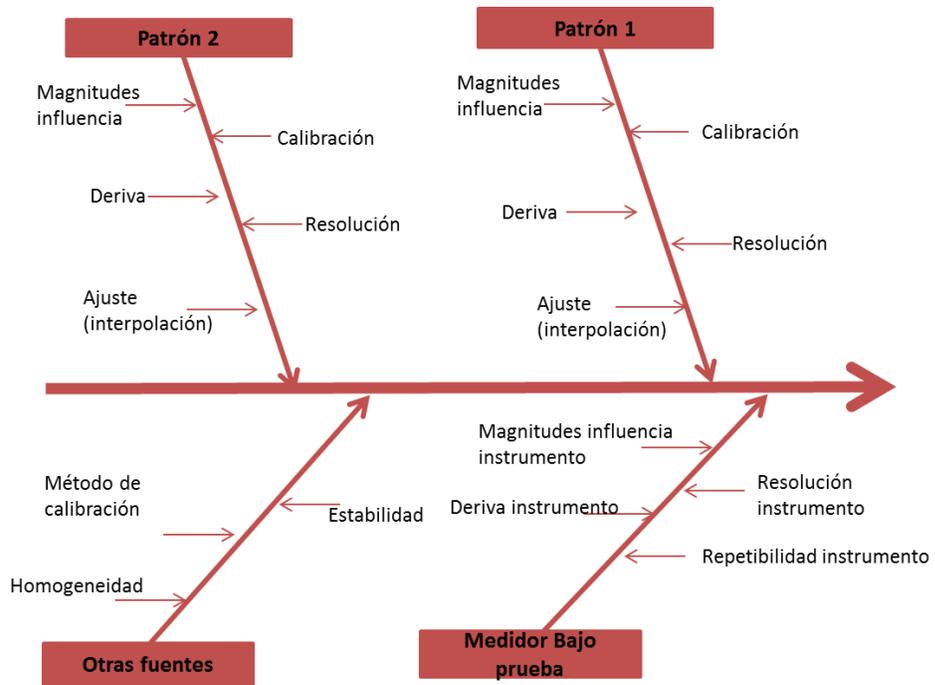


Figura 1: Diagrama de fuentes de incertidumbre para instrumento con indicación directa.

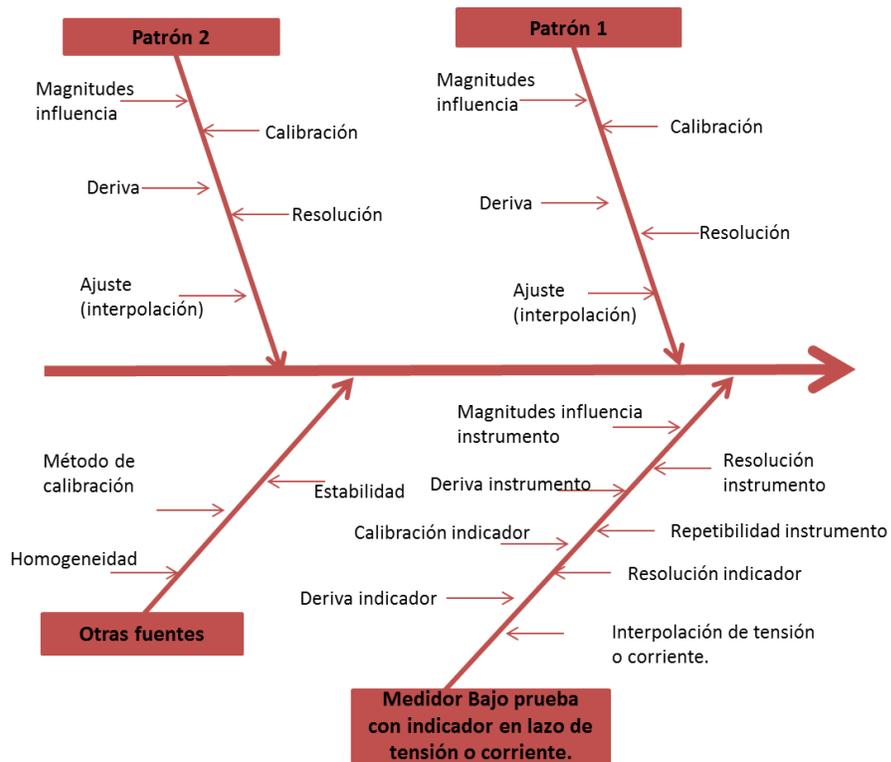


Figura 2: Diagrama de fuentes de incertidumbre para instrumento con indicador en lazo de tensión o corriente.

A continuación se presentan las fuentes de incertidumbre, el tipo de evaluación (tipo A o tipo B) para cada una de éstas y la distribución de probabilidad asociada que se usa para reducirlas a valores de incertidumbre estándar para su posterior combinación.

Tabla 20: Descripción, cuantificación y reducción de fuentes de incertidumbre.

Descripción	Fuente de incertidumbre	Referencia o criterio aplicado	Simb	Tipo	Distribución	Fórmula
Corrección en la Indicación del Patrón 1 HR _{MM1} (HL-024) U _{cMM1}	Calibración	Se obtienen a partir de los datos del certificado de calibración del patrón correspondiente, dividida entre el factor de cobertura.	U _{c1}	B	Normal	$\frac{U_c}{k}$
	Deriva	Deriva máxima del patrón en el periodo de calibración elegido sobre $\sqrt{3}$.	U _{d1}	B	Rectangular	$\frac{D_{MM}}{\sqrt{12}}$
	Resolución	Resolución observada en el indicador de los patrones dividida sobre $\sqrt{12}$.	U _{1,res}	B	Rectangular	$\frac{Res_{MM}}{\sqrt{12}}$
	Fuentes de variabilidad	Si cuenta con un coeficiente de variación de la indicación de temperatura o humedad obtenido en el manual del fabricante (a) debido a la temperatura ambiente y del medio de calibración, se multiplica por ΔT y se divide entre $\sqrt{3}$, siendo ΔT la variación de temperaturas entre calibración y certificado.	U _{1,mi}	B	Rectangular	$\frac{a * \Delta T_{MM}}{\sqrt{3}}$
Corrección en la Indicación del Patrón 2 HR _{MM2} (HL-025) U _{cMM2}	Calibración	Se obtienen a partir de los datos del certificado de calibración del patrón correspondiente, dividida entre el factor de cobertura.	U _{c2}	B	Normal	$\frac{U_c}{k}$
	Deriva	Deriva máxima del patrón en el periodo de calibración elegido, dividida sobre $\sqrt{3}$.	U _{d2}	B	Rectangular	$\frac{D_{MM}}{\sqrt{12}}$
	Resolución	Resolución observada en el indicador de los patrones dividida sobre $\sqrt{12}$.	U _{2,res}	B	Rectangular	$\frac{Res_{MM}}{\sqrt{12}}$

Descripción	Fuente de incertidumbre	Referencia o criterio aplicado	Simb	Tipo	Distribución	Fórmula
	Fuentes de variabilidad	Si cuenta con un coeficiente de variación de la indicación de temperatura o humedad obtenido en el manual del fabricante (a) debido a la temperatura ambiente y del medio de calibración, se multiplica por ΔT y se divide entre $\sqrt{3}$, siendo ΔT la variación de temperaturas entre calibración y certificado.	$U_{2,mi}$	B	Rectangular	$\frac{a * \Delta T_{MM}}{\sqrt{3}}$
Corrección en la indicación del instrumento bajo prueba HR_{MUT}	Resolución	Resolución observada en el indicador del instrumento bajo prueba.	$U_{x,res}$	B	Rectangular	$\frac{Res_x}{\sqrt{12}}$
	Fuentes de variabilidad	Si cuenta con un coeficiente de variación de la indicación de temperatura o humedad obtenido en el manual del fabricante (a) debido a la temperatura ambiente y del medio de calibración, se multiplica por ΔT y se divide entre $\sqrt{3}$, siendo ΔT la variación de temperaturas entre calibración y certificado.	$U_{x,mi}$	B	Rectangular	$\frac{a * \Delta T_x}{\sqrt{3}}$
	Repetibilidad	Obtenida de la desviación de los resultados obtenidos por las repeticiones en cada punto de calibración, se divide entre \sqrt{n} , siendo n el número de lecturas.	$U_{x,r}$	A	Normal	$\frac{U_{rep}}{\sqrt{n}}$
	Histéresis	Se obtiene a partir de la diferencia en la repetición de lectura en 50% hr, luego de haber completado la calibración.	$U_{x,h}$	A	Normal	$\frac{U_{his}}{\sqrt{3}}$
Indicador de tensión o corriente	Calibración del indicador	Se obtienen a partir de los datos del certificado de calibración del indicador correspondiente, dividida entre el factor de cobertura.	$U_{c,ind}$	B	Rectangular	$\frac{U_c}{k}$
	Resolución del indicador	Resolución observada en el indicador del medidor bajo prueba dividida sobre $\sqrt{12}$.	$U_{res,ind}$	B	Rectangular	$\frac{Res_{ind}}{\sqrt{12}}$

Descripción	Fuente de incertidumbre	Referencia o criterio aplicado	Simb	Tipo	Distribución	Fórmula
	Ajuste por interpolación de tensión o corriente	Corresponde a la incertidumbre debida al error de interpolación a través de la curva que escala la indicación en tensión y/o corriente a humedad relativa.	$U_{int,ind}$	B	Rectangular	$\frac{Residuo\ de\ int_{ind}}{\sqrt{3}}$
	Deriva del indicador en tensión o Corriente	Deriva máxima del indicador en el periodo de calibración elegido, dividida sobre $\sqrt{3}$.	$U_{d,ind}$	B	Rectangular	$\frac{D_{ind}}{\sqrt{3}}$
Otras fuentes	Estabilidad del medio	Máxima desviación estándar de medición obtenida experimentalmente por los patrones de referencia, a través de caracterizaciones realizadas en puntos estratégicos del volumen de calibración.	U_{EH}	B	Rectangular	$\frac{U_{eh}}{\sqrt{12}}$
	Uniformidad del medio	Máxima diferencia de medición obtenida experimentalmente por los patrones de referencia, a través de caracterizaciones realizadas en puntos estratégicos del volumen de calibración.	U_{UF}	B	Rectangular	$\frac{U_{uf}}{\sqrt{12}}$

 **Nota:** Los correspondientes valores para las lecturas de temperatura son idénticos pero sustituyendo los índices “HR” por “T”; si el indicador tiene la facultad de medir en °C, se omitirá la incertidumbre por interpolación y se tomarán los valores de incertidumbre ofrecidos por el certificado correspondiente en temperatura.

A1.4 COEFICIENTES DE SENSIBILIDAD

Con base en el modelo matemático expresado en la Ecuación 12 y las ecuaciones de complemento **Ecuación 13 y Ecuación 14**, se determinan los coeficientes de sensibilidad para cada una de las fuentes de incertidumbre establecidas. Estos coeficientes son empleados para evaluar la incertidumbre combinada del error de medición.

Modelos matemáticos	Variable X_i	Coefficiente de sensibilidad ad (ci)	Variable X_i	Coefficiente de sensibilidad ad (ci)	Variable X_i	Coefficiente de sensibilidad (ci)	Variable X_i	Coefficiente de sensibilidad (ci)
HR_{MM} $= \frac{1}{2}$ $* [HR_{MM1}$ $+ \delta HR_{C1}$ $+ \delta HR_{d1}$ $+ \delta HR_{1,res}$ $+ \delta HR_{1,mi}$ $+ \delta HR_{1,int}$ $+ \delta HR_{MM2}$ $+ \delta HR_{C2}$ $+ \delta HR_{d2}$ $+ \delta HR_{2,res}$ $+ \delta HR_{2,mi}$ $+ \delta HR_{2,int}]$ $+ \delta HR_{UF}$ $+ \delta HR_{EH}$	$\frac{\partial C_{HR}}{\partial \delta HR_{C1}}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{\partial C_{HR}}{\partial \delta HR_{1,mi}}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{\partial C_{HR}}{\partial \delta HR_{d2}}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{\partial C_{HR}}{\partial \delta HR_{2,int}}$	$\frac{1}{2}$
	$\frac{\partial C_{HR}}{\partial \delta HR_{d1}}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{\partial C_{HR}}{\partial \delta HR_{1,int}}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{\partial C_{HR}}{\partial \delta HR_{2,res}}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{\partial C_{HR}}{\partial \delta HR_{UF}}$	1
	$\frac{\partial C_{HR}}{\partial \delta HR_{1,re}}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{\partial C_{HR}}{\partial \delta HR_{C2}}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{\partial C_{HR}}{\partial \delta HR_{2,mi}}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{\partial C_{HR}}{\partial \delta HR_{EH}}$	1
HR_{MUT} $= HR_x$ $+ \delta HR_{x,res}$ $+ \delta HR_r$ $+ \delta HR_{x,mi}$	$\frac{\partial C_{HR}}{\partial \delta HR_{x,re}}$	-1	$\frac{\partial C_{HR}}{\partial \delta HR_{max}}$	0	$\frac{\partial C_{HR}}{\partial I_{min}}$	0	$\frac{\partial C_{HR}}{\partial V_{min}}$	0
	$\frac{\partial C_{HR}}{\partial \delta HR_r}$	-1	$\frac{\partial C_{HR}}{\partial \delta HR_{min}}$	0	$\frac{\partial C_{HR}}{\partial I_{MUT}}$	- $(\frac{HR_{max}-HR_{min}}{I_{max}-I_{min}})$	$\frac{\partial C_{HR}}{\partial V_{MUT}}$	- $(\frac{HR_{max}-HR_{min}}{V_{max}-V_{min}})$
	$\frac{\partial C_{HR}}{\partial \delta HR_{x,m}}$	-1	$\frac{\partial C_{HR}}{\partial I_{max}}$	0	$\frac{\partial C_{HR}}{\partial V_{max}}$	0		



Nota: Los correspondientes valores para las lecturas de temperatura son idénticos pero sustituyendo los índices "HR" por "T"; si el indicador tiene la facultad de medir en °C, se omitirá la incertidumbre por interpolación y se tomarán los valores de incertidumbre ofrecidos por el certificado correspondiente en temperatura.

A1.5 INCERTIDUMBRE COMBINADA

La incertidumbre combinada se obtiene haciendo uso de la “ley de propagación de las incertidumbres”, expresada mediante:

$$u_C = \sqrt{\sum (c_i \cdot u_i)^2}$$

A1.6. FACTOR DE COBERTURA k

El factor de cobertura se calcula, para un nivel de confianza de aproximadamente el 95%, utilizando la función t-student, a partir de los grados de libertad obtenidos para la incertidumbre combinada. Estos grados de libertad se estiman con la ecuación de Welch-Satterthwaite, así:

$$V_{eff} = \frac{[u_c(y)]^4}{\sum \frac{[c_i \cdot u(x_i)]^4}{v_i}}$$

Donde el subíndice i identifica cada una de las variables del modelo matemático.

A1.7 INCERTIDUMBRE EXPANDIDA

La incertidumbre expandida es expresada con un factor de cobertura k para un nivel de confianza de aproximadamente el 95%.

$$U = u_{cT} \cdot k$$

